



Vliv infračerveného záření na šíření plamene v textilii

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství

Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství

Autor práce: **Bc. Leona Zimová**

Vedoucí práce: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.





The infrared radiation influence on the frame spreading in textiles

Master thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering
Author: **Bc. Leona Zimová**
Supervisor: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.





TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní

Zadání diplomové práce

Vliv infračerveného záření na šíření plamene v textilií

Jméno a příjmení: **Bc. Leona Zimová**
Osobní číslo: T16000012
Studijní program: N3957 Průmyslové inženýrství
Studijní obor: Produktové inženýrství
Zadávací katedra: Katedra hodnocení textilií
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte rešerši na téma hoření textilií
- 2) Navrhněte a sestavte zařízení pro monitorování šíření plamene ve vodorovně umístěné textilií
- 3) Kvantifikujte rychlost šíření plamene na vybraných plošných textiliích
- 4) Navrhněte a otestujte jednoduchý model šíření plamene založený na absorpci infračerveného záření textilií
- 5) Výsledky diskutujte s ohledem na reálné podmínky šíření plamene v textilií

Rozsah pracovní zprávy: 50 – 60 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

1. DEMIDOV, Petr Georgijevič. Hoření a vlastnosti hořlavých látek. Praha: Československý svaz požární ochrany, 1966. Knižnice požární ochrany (Československý svaz požární ochrany).
2. RŮŽIČKA, František. Rozdělení hořlavých látek a jejich požárně technické charakteristiky. 1. vyd. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. ISBN 80-86111-46-6.
3. GAUSSORGUES, Gilbert. Infrared Thermography. Microwave and RF Techniques and Applications. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9401107114.

Vedoucí práce: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství
Konzultant práce: Ing. Marie Kašparová, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství
Datum zadání práce: 16. dubna 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 18. dubna 2019


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

V Liberci 7. února 2019




doc. Ing. Vladimír Bajzik, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

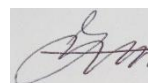
Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom-to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.



9. 4. 2019

Bc. Leona Zimová

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Jakubovi Wienerovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady nejen při modelování tepelných procesů a odborné vedení diplomové práce. Rovněž bych chtěla poděkovat Ing. Marii Kašparové, Ph.D. za trpělivost při konzultacích. V neposlední řadě děkuji panu Trefášovi a Zajícovi za výrobu zařízení pro měření.

Velké poděkování náleží i mé rodině a příteli za podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlivem infračerveného záření na šíření plamene v textiliích. Zaměřuje se na charakteristiku emisivity plamene, rychlosti šíření plamene a zjištění pohltivosti IR záření textilií. Práce analyzuje jejich vzájemné vztahy a následně je implementuje v rámci modelování šíření plamene.

Klíčová slova: oheň, plamen, hoření, spektrofotometrie, teplo, teplota, emisivita

Annotation

The master thesis deals with the influence that infrared radiation has over the propagation of flames in textiles. It specifically focuses on flames' emissions, velocity of the flame propagation and textiles' IR absorption. This master thesis furthermore analysis mutual connections and applies them in the modeling of the flames' propagation.

Key words: fire, flame, combustion, spectrophotometry, heat, temperature, emissivity

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk: | 9 |
| Úvod | 11 |
| 1 . Rešeršní část | 12 |
| 1.1 Hoření obecně | 12 |
| 1.2 Základní pojmy hoření | 13 |
| 1.3 Specifikace plamene | 16 |
| 1.4 Fáze hoření | 17 |
| 1.5 Hořlavost materiálů | 18 |
| 1.6 Požární informace o textiliích | 19 |
| 1.7 Nehořlavé úpravy textilií | 20 |
| 1.8 Zkoušky hořlavosti | 21 |
| 1.9 Sdílení tepla | 22 |
| 1.10 Způsoby sdílení tepla | 23 |
| 1.11 Elektromagnetické spektrum | 25 |
| 1.12 Absolutně černé těleso | 27 |
| 1.13 Emisivita | 28 |
| 1.14 Infračervená termografie | 30 |
| 1.15 Princip funkce infrateploměru | 31 |
| 1.16 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty | 33 |
| 2 . Experimentální část | 34 |
| 2.1 Použité materiály a chemikálie | 34 |
| 2.1.1 Úprava textilních materiálů | 37 |
| 2.1.2 Doprovodné fólie | 40 |
| 2.2 Použité přístroje, pomůcky a metody | 40 |
| 2.2.1 Měření prodyšnosti textilie | 40 |
| 2.2.2 Měření teploty pomocí IR teploměru | 41 |
| 2.2.3 Měření pohltivosti IR záření textilií | 42 |
| 2.2.4 Zařízení pro měření textilií | 43 |
| 2.3 Příprava vzorků | 44 |
| 3. Výsledky a diskuze | 46 |
| 3.1 Hoření textilií | 46 |
| 3.2 Vliv úpravy IR absorpce textilie na hoření | 51 |
| 3.3 Měření IR kamerou a IR teploměrem | 52 |
| 3.4 Emise záření plamene | 53 |
| 3.5 Naměřená spektra FTIR | 56 |
| 3.6 Pohlcení energie textilií | 58 |
| 3.7 Modelování šíření plamene | 61 |
| 3.8 Model vlivu IR záření na šíření plamene | 62 |
| 4. Závěr | 68 |
| Seznam použité literatury | 69 |
| Seznam obrázků | 73 |
| Seznam tabulek | 74 |
| Seznam příloh | 74 |

Seznam použitých zkratk:

| Zkratka/symbol | Význam |
|--------------------|--|
| α | součinitel přestupu tepla |
| Δ | rozdíl hodnot |
| ε | emisivita |
| π | Ludolfova konstanta |
| λ | tepelná vodivost/ vlnová délka |
| σ | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| σ^2 | rozptyl základního souboru |
| $^{\circ}\text{C}$ | jednotka teploty |
| A | jednotka elektrického proudu |
| b | Wienova konstanta |
| c | rychlost světla |
| CA | acetát |
| c_j | měrná tepelná kapacita |
| cm^{-1} | jednotka vlnočtu |
| cm^3 | jednotka objemu |
| CO | bavlna |
| CTA | triacetát |
| FTIR | Fourier transform infrared |
| grad T | gradient teploty |
| h | Planckova konstanta |
| h_p | výška plamene |
| IR | infračervené záření |
| ISO | International Organization for Standardization |
| J | jednotka tepla |
| K | jednotka teploty |
| k | Boltzmannova konstanta |
| KMI | katedra materiálového inženýrství |
| kg | jednotka hmotnosti |
| LKČ | limitní kyslíkové číslo |
| M | intenzita vyzařování |

| | |
|----------------|--|
| m | hmotnost |
| mbar | jednotka tlaku |
| mm | jednotka délky |
| m ² | jednotka obsahu |
| n | počet hodnot souboru |
| Pa | jednotka tlaku |
| PA | polyamid |
| PAN | polyakrylonitril |
| PES | polyester |
| P _k | tepelný tok |
| PP | polypropylen |
| PTCH | požárně technické charakteristiky |
| q | hustota tepelného toku |
| Q | sdílené teplo |
| S | plocha povrchu |
| T | termodynamická teplota |
| T _o | teplota okolí/ prostoru vně uvažované soustavy |
| T _s | teplota soustavy/ prostoru s látkovou náplní |
| V | jednotka elektrického napětí |
| VS | viskóza |
| v _p | rychlost plamene |
| W | jednotka výkonu |
| WO | vlna |
| \bar{x} | aritmetický průměr |
| x _i | jednotlivé hodnoty souboru |
| Zn. | značení |

Úvod

Prací na analýzu hořlavosti a nehořlavosti textilií je k dispozici velké množství, je vyvinuta i celá řada metod a přístrojů. Z nichž je vhodné zmínit ISO, jako je např. ISO 6940 - Zjišťování snadnosti zapálení svisle umístěných zkušebních vzorků, ISO 6941 - Měření rychlosti šíření plamene u svisle umístěných zkušebních vzorků, ISO 9772.3 - Stanovení horizontálních charakteristik hoření malých vzorků vystavených malému plameni, ISO 9773 - Stanovení hořlavosti tenkých ohebných vzorků při působení malého plamene jako zdroje zapálení. Příslušné přístroje jako jsou horizontální, vertikální a další testery hořlavosti lze najít na stránkách mnoha výrobců, v ČR jsou poměrně rozšířené např. výrobky firmy SDL ATLAS. Přesto však není k dispozici model analyzující a předpovídající reálnou rychlost šíření plamene při hoření textilií.

V rámci této studie je řešena problematika horizontálního šíření plamene, a to bez cíleně vyvolaného komínového efektu a bez nuceného proudění vzduchu při experimentu. Představou tedy je, že se na šíření ohně v plošném materiálu (textilii) podílí prakticky jen infračervené záření, které předežhřívá textilií až na teplotu hoření a plamen se tak může dále šířit.

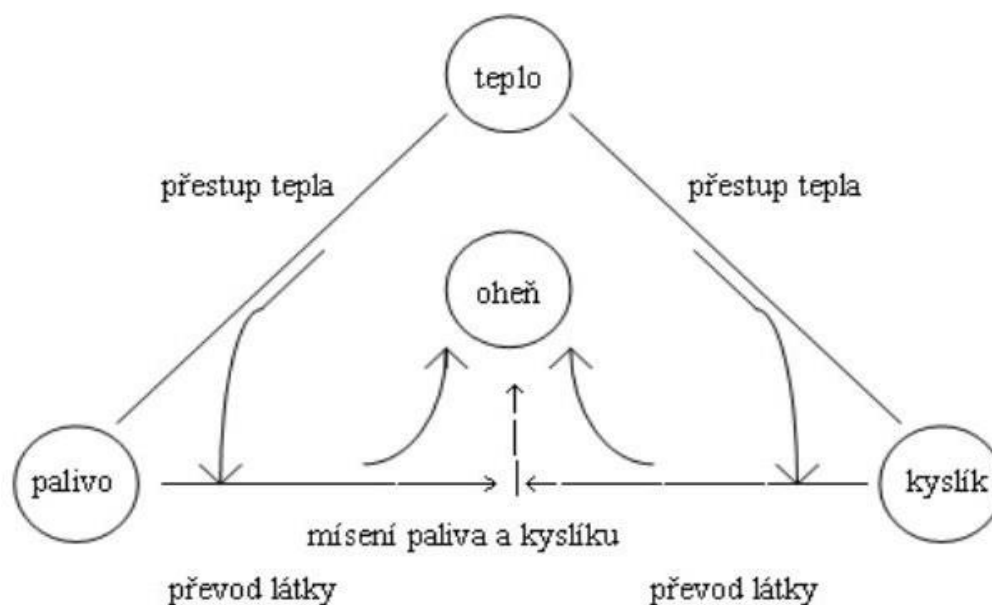
Cílem práce tedy je zjistit reálné rychlosti šíření plamene a navrhnout model simulující vliv IR záření na šíření plamene, díky němuž by bylo možné kvantifikovat vliv IR záření na šíření plamene na hořící textilii. Výsledný model bude schopen předpovědět rychlost šíření ohně na různých textiliích, což dopomůže nejen hasičským záchranným sborům lépe definovat materiály z hlediska hoření, ale bude možné posoudit i stávající nehořlavé úpravy a případně vyvinout nové.

1. Rešeršní část

V této části diplomové práce je pro lepší porozumění problematice popsána oblast hoření, požárně technické charakteristiky textilních materiálů, jejich nehořlavé úpravy, základní principy sdílení tepla a informace potřebné pro měření pomocí infračerveného teploměru, jako je elektromagnetické spektrum, emisivita atd.

1.1 Hoření obecně

Je to proces, probíhající od počátečního působení tepla, až po konečné uhasnutí plamene. Fyzikálně-chemická reakce, která probíhá za přítomnosti hořlavé látky, přísunu vzduchu, který je částečně složen z kyslíku, na němž hoření závisí a zdroje zapálení. Samotné hoření je reakce hořlavé látky a kyslíku znázorněné na obrázku 1, při čemž se uvolňuje tepelná energie a světelné záření. [1]



Obr. 1: Popis procesu hoření [2]

1.2 Základní pojmy hoření

Textilie jsou obecně vysoce hořlavými materiály (až na několik výjimek), což je dáno nejen chemickým složením vláknotvorných polymerů, ale také specifickou strukturou textilií. Pro lepší orientaci v problematice je vhodné předem definovat základní pojmy využívané pro popis materiálů z hlediska požárních rizik. Nejdůležitější termíny z oblasti hoření jsou:

Plamen

Vnější projevem reakcí oxidace je plamen, vyskytující se u hoření látek, které se mohou přeměnit v páry a plyny. U látek pevných, které nemohou uvolňovat hořlavé páry a plyny se odehrává tzv. hoření bezplamenné např. doutnání. Většina případů se však uskutečňuje v plynném stádiu za vzniku plamene. Plamen je možné dělit dle:

- a) možnosti mísení plynné směsi na *kinetický* – hořlavá látka je dopředu smíchána s prostředkem oxidace např. výbuch plynu a *difúzní* – smíchání probíhá až při samotném hoření, např. hoření čistého plynu v hořáku;
- b) druhu šíření plamene na *stacionární* – plamen je fixován a *nestacionární* – plamen se v prostoru různě posouvá;
- c) způsobu proudění plynné směsi na *laminární* – všechny proudnice jsou přibližně rovnoběžné a na *turbulentní* – částice mající nepravidelné dráhy mění rychlost a směr. Laminární plamen může přejít v turbulentní, pokud se zvýší rychlost proudění;
- d) oxidace uhlíku na *nesvítivý* – hořlavá látka zahrnuje více než 50 % kyslíku a obsažený uhlík začíná oxidovat před pásmem hoření. *Svítivý* – hořlavá látka obsahuje méně než 50 % kyslíku, volný uhlík se přesouvá do pásma hoření, kde oxiduje, žhne a díky tomu svítí. Plamen *čadivý*, pokud se v hořlavé látce vyskytuje více než 60 % uhlíku a téměř žádný nebo žádný kyslík, uhlík není schopen dostatečně rychle oxidovat ani v pásmu hoření a odchází v podobě sazí. [3]

Teplota vzplanutí

Teplotou vzplanutí je nazývána nejnižší teplota, při níž hořlavá látka za standardního tlaku uvolní takové množství hořlavých par, že ve směsi se vzduchem krátce vzplanou, pokud se do těsné blízkosti umístí otevřený plamen. Po oddálení však dále nehoří, protože ještě nebylo odpařováním uvolněno další množství par, aby hoření mohlo pokračovat.

U teplot pod bodem vzplanutí není možné zapálení, protože tlak par není dostačující pro vytvoření zápalné směsi se vzduchem. Přesto není možné vyloučit nebezpečí požáru, protože zdrojem zapálení může být látka, která se velmi rychle dostala na svou teplotu vzplanutí. [4]

Teplota vznícení

Pojmem teplota vznícení je označována nejnižší teplota, při které se hořlavá látka ve směsi se vzduchem sama bez podpory jakéhokoli zdroje, např. plamene nebo elektrického proudu vznítí. Z toho vychází předpoklad, že směs látek a kyslíku je možné zapálit navýšením teploty vzduchu proudícího okolo.

Teplota vznícení je značně ovlivněna mnoha faktory, zejména:

- koncentrací plynu, páry ve směsi s oxidovadlem – teoretická nejnižší teplota vznícení je v stechiometrickém bodě (poměr hořlavé látky a oxidovadla je ideální);
- tlakem plynu a páry (při zvyšujícím se tlaku, teplota vznícení klesá);
- katalyzátory (ovlivňují rychlost chemické reakce a tím zvýšení nebo snížení teploty vznícení – jedná se např. o materiál nádoby, ve které ke vznícení dochází);
- oxidačním prostředkem (snižují teplotu vznícení - např. chlorečnany, manganistany);
- objemem a tvarem látky (při stejném tvaru, za zvyšujícího se objemu, teplota vznícení klesá, avšak pouze do určitého bodu, poté se teplota vznícení nemění).

[3]

Působením kombinací těchto faktorů je možné teplotu vznícení ovlivňovat, ať už směrem nahoru nebo dolů. Pro ukázkou jsou teploty vznícení některých obecně známých látek vyjádřeny v tabulce 1.

Tab. 1: Teploty vznícení vybraných látek [5]

| Název látky | Teplota vznícení [°C] |
|----------------|-----------------------|
| Dřevo | 270 |
| PVC | 350 |
| Bavlna | 450 |
| Papír | nad 185 |
| Tkaniny obecně | nad 290 |
| Přýž | 400 |
| Benzín | 246 |

Teplota žhnutí

Za teplotu žhnutí je považována nejnižší teplota, při které tuhé těleso žhne bez působení otevřeného zdroje zapálení. K samotnému procesu žhnutí dochází typicky u drobného prachu či sypkých materiálů s vyšší jemností, výše teploty při žhnutí se odvíjí od tloušťky naneseného prachu. Při reakci dochází k zapálení plynných zplodin vzniklých rozkladem látky a vzduchu, zdrojem může být jakákoli horká plocha, např. topné těleso, žhavá smyčka atd. [4]

Teplota hoření

Pod pojmem teplota hoření se rozumí nejnižší teplota látky, při které vzniká takové množství hořlavých plynů, že se v případě přiblížení otevřeného zdroje hoření páry vznítí a dále hoří i bez podpory zdroje. Pokud tedy teplota dosáhne daného stupně hoření, rychlost odpařování se rovná rychlosti spalování a plyny se vytváří v potřebném množství pro udržení samostatného spalování.

Samotné hoření nastává při vyšší teplotě než pouhé vzplanutí, při níž látka sama nehoří. U nízkovroucích tekutin (atmosférický tlak 101 kPa, teplota varu méně než 50 °C) je tento rozdíl teplot téměř zanedbatelný, ale s klesající těkavostí tekutin tento rozdíl narůstá. [4]

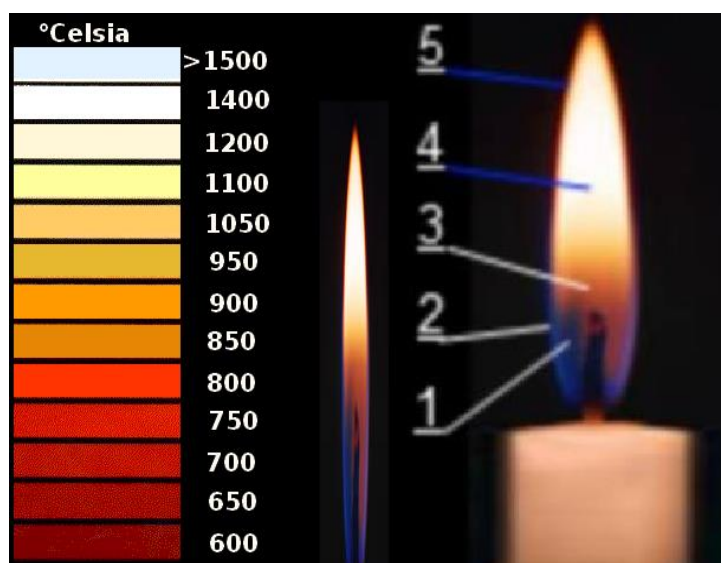
1.3 Specifikace plamene

Plamen hořící textilie je v případě této práce chápán jako zdroj infračerveného záření o teplotě 550 °C až 1 100 °C. Toto rozmezí teplot vychází z přímého měření plamene hořící textilie při experimentu a také z literárních zdrojů, kde jsou uváděny teploty plamene materiálů blízkých textiliím, viz tabulka 2.

Tab. 2: Teploty plamene [6]

| Zdroj plamene | Teplota [°C] |
|--------------------|--------------|
| Zápalka | 540 – 720 |
| Zapalovač | 640 – 760 |
| Topeniště s dřívím | 700 – 1 100 |
| Svíčka | 640 – 900 |

Pro plamen svíčky platí, že nejteplejší, nesvítivý úsek je po stranách plamene nahoře nad tmavě modrou částí, viz obrázek 2, označení číslem 5 (okolo 1 400 °C). Avšak tato část plamene je natolik malá, že z ní uniká i velmi málo tepelné energie. Teplota ve většině míst svítivého plamene se pohybuje v rozmezí 640–900 °C. Bod 1, tedy nesvítivá část okolo plamene dosahuje teplot přibližně 600 °C. Teplota modré zóny (2) se pohybuje kolem hodnoty 800 °C. Teplota v části nad knotem (3) dosahuje 1 000 °C, jasně žlutá část má teplotu přibližně 1 200 °C (4). [6, 7, 8]



Obr. 2: Teploty v různých částech plamene [8]

1.4 Fáze hoření

Při reakci před zapálením dochází za působení tepelné energie k uvolňování mezimolekulárních vazeb, při různých teplotách dochází k jednotlivým typům reakcí. Za působení nízkých teplot, v oblasti mezi teplotou měknutí a teplotou tání, dochází k narušování nadmolekulární struktury vláknenných materiálů. Při dalším zvýšení teploty dochází k degradaci řetězce tzv. depolymeraci, přičemž vznikají složky tuhé, kapalné i plynné. Tento proces se označuje jako pyrolýza a jeho rychlost je přímo úměrná zvyšování teploty.

Následné zapálení je endotermický pochod, při kterém se zapalují hořlavé plyny vzniklé při pyrolýze. Dochází buď k samovznícení, tj. zapálení bez vnějšího zápalného zdroje jen díky vysoké teplotě anebo zapálení vnějším zápalným zdrojem (plamenem). [9]

Exotermní proces hoření je, když tepelná energie nejdříve rozloží molekuly paliva na menší části, nazývané "volné radikály", které jsou nestabilní a vysoce reaktivní. Hoření pokračuje formováním volných radikálů a následnou reakcí s kyslíkem. Některé látky zpomalující hoření se působením tepla rozpadají a vyrábějí své vlastní volné radikály, ty pak reagují přednostně s volnými radikály zpomalujícími hoření namísto kyslíku, čímž zabrání spalování. Nekontrolovaný oheň se pak sám šíří tím, že hořící materiál ohřívá okolní vzduch a materiál, který dosud nehoří. [10]

Proces hoření může být zpomalen nebo urychlen některými vlastnostmi. Mezi tyto vlastnosti patří např. tepelná vodivost, bod tání, či měrná tepelná hmotnost. V neposlední řadě je možné ovlivnit hoření chemickým složením materiálu (množství přítomného uhlíku, kyslíku, vodíku), fyzikálními vlastnostmi (srážlivost a tavitelnost) a geometrickými vlastnostmi (hmotnost, rozměry).

Zda po zapálení materiálu bude proces hoření pokračovat samostatně, záleží na energetické bilanci. Proto dělíme hoření na procesy, kdy se energie spotřebovává a procesy, při kterých se naopak energie uvolňuje. Pokud se energie více uvolňuje než spotřebovává, materiál hoří, v případě nehořlavých materiálů je spotřeba energie větší než uvolněná. [2]

1.5 Hořlavost materiálů

Nejen textilní vlákna, ale obecně všechny materiály lze rozdělit do tří kategorií podle jejich hořlavosti na:

- a) *vlákna hořlavá* – samovolně hoří i po oddálení plamene od materiálu, typickým zástupcem hořlavých vláken je např. bavlna, len a polyakrylonitril;
- b) *vlákna samozhášející* – mají schopnost hořet, avšak pouze do doby, než se materiál vyjme z plamene, poté zhasínají např. polyester, přírodní hedvábí, polyamid;
- c) *vlákna nehořlavá* – postrádají vlastnost hoření, při vložení do plamene se některá vlákna taví, s odejmutím však ihned zhasínají, jedná se např. o polyvinylchlorid, oxidovaný polyakrylonitril. [11]

Správnému zařazení do kategorie hořlavosti napomáhá i limitní kyslíkové číslo (LKČ), které poskytuje informace o hořlavosti materiálů a účinnosti nehořlavých úprav. Pomocí rovnice (1) je možné určit nejnížší možnou koncentraci kyslíku O spolu s dusíkem N (v %), která je ještě dostačující pro hoření materiálu při testování.

$$LKČ = \frac{[O_2]}{[N_2] + [O_2]} * 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Ve vzorci tedy O₂ značí objem kyslíku a N₂ objem dusíku. Pokud je výsledek LKČ pod hodnotou 20, materiál je lehce hořlavý a k reakci postačí malé množství kyslíku. Naopak výsledek LKČ nad 25 značí, že materiál bude těžce hořlavý a spotřeba kyslíku se s rostoucí hodnotou LKČ bude zvyšovat. Údaje týkající se hoření vybraných materiálů jsou v tabulce 3. [12]

Tab. 3: Limitní kyslíkové číslo vybraných látek [12]

| Vlákno | LKČ [%] |
|------------|---------|
| Bavlna | 19 |
| Viskóza | 20 |
| Polyamid 6 | 20 |
| Polyester | 21 |
| Vlna | 25 |
| Kevlar | 29 |
| Nomex | 30 |

1.6 Požární informace o textiliích

Pro předcházení vzniku požáru či následné možnosti předvídat jeho šíření je nutné znát různé parametry hořlavosti textilií, jako je výše popsaná teplota vzplanutí, vznícení či žhnutí. Požárně technické informace napomáhají pozdější práci s textiliemi, ať už se jedná o výběr vhodné finální úpravy, či jejich konečné využití v běžném světě.

Požárně technické charakteristiky textilií uvedené v tabulce 4 (označení ne znamená, že PTCH nebyly stanoveny) naznačují nejasnost a rozporuplnost správného označování textilních materiálů v oboru bezpečnosti a hasičství. Z toho je možné usuzovat na neodbornost autora či malý zájem o hledání souvislostí mezi strukturou materiálu a jeho požárními riziky. Druhou možností je uvažování silné závislosti těchto teplot na nadvlákněné struktuře u jednotlivých druhů textilií, např. bavlny. Tyto důvody zapříčiňují rozdíly v teplotách vzplanutí přibližně 150 °C.

Tab. 4: Vznětlivost výrobků z plošných textilií [13]

| Název výrobku | Teplota [°C] | | |
|------------------|--------------|-----------|--------|
| | vzplanutí | vznícení | žhnutí |
| VLNA | | | |
| Šatovka | ne | 550 | ne |
| Valchovaná plst | 380 | do 520 ne | |
| BAVLNA | | | |
| Záclona | 295 | 305 | ne |
| Ubrus | 415 | ne | 335 |
| Tkanina Novino | 385 | ne | 305 |
| Příze | 420 | ne | 280 |
| VISKÓZA | | | |
| Knihařské plátno | 360 | ne | 380 |
| Příze | 380 | ne | 325 |
| Potahová látka | 360 | ne | 270 |
| Tkanina Denka | 365 | 455 | ne |
| POLYAMID | | | |
| Sítovina | 435 | 475 | ne |
| Tyl | 435 | 465 | ne |
| Vlasec | 410 | 460 | ne |

| | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|
| POLYPROPYLEN | | | |
| Netkaná textilie | 380 | ne | ne |
| Vlasec | 340 | 400 | ne |
| Fólie | 370 | 380 | ne |
| POLYAKRYLONITRIL | | | |
| Leskymo | 190 | 450 | ne |
| POLYESTER | | | |
| Záclona | 395 | 485 | ne |
| Ubrus | 435 | 485 | ne |
| Textilie Šárka | 385 | 465 | ne |
| Příze | 425 | 475 | ne |
| BAVLNA/POLYESTER (%) | | | |
| Textilie Rogun 76/24 | 345 | 465 | ne |
| Textilie TB 202 A 50/50 | 395 | 465 | ne |
| Příze 50/50 | 440 | ne | 280 |

1.7 Nechořlavé úpravy textilií

Nebezpečí požáru, toxické zplodiny a další rizika, nutí stále více výrobců textilií opatřovat materiály z lehce hořlavých vláken (např. bavlna) povrchovou úpravou či používat vlákna se sníženou hořlavostí (Nomex). Aplikace povrchové úpravy závisí na vlastnostech materiálu, který je upravován a na termických vlastnostech retardéru. Zpomalení hoření může nastat díky těmto teoriím:

- teorie vrstvy* – na povrchu vláken se vytvoří ochranný film, který chrání před kontaktem se vzduchem, tuto schopnost má např. kyselina boritá;
- teorie ochlazování* – hořící textilie je ochlazována vodou, která se uvolňuje a následně odpařuje pomocí retardéru hoření z vlákna, ve kterém byla skrytě vázána, používá se např. chlorid zinečnatý;
- teorie plynová* – vznikají zde nehořlavé plyny a páry, které snižují koncentraci hořlavých zplodin a zabraňují přístupu vzduchu, podobně jako ochranný film v teorii vrstvy, nejúčinnější jsou amonné soli;
- teorie chemická* – donedávna se spojovala pouze s retardací hoření celulózy, v současné chvíli je akceptovatelná i pro ostatní polymery. Ovlivnění teploty

pyrolýzy ovlivňuje i samotný průběh, např. vlákna Nomex či Kevlar jsou odolnější a stabilnější díky zvýšení teploty při pyrolýze. [14]

Konečnou fází hoření, tedy doutnání lze odstranit např. použitím sloučenin fosforu. Při použití nehořlavých úprav se pro dosažení optimálních vlastností obvykle kombinuje několik možností retardace. Všechny úpravy je možné rozčlenit do tří kategorií dle jejich trvanlivosti:

- a) *úprava dočasná* – nemá stálosti ve vodě a díky tomu je snadno vypratelná. Používá se pouze pro textilie, které neprijdou do kontaktu s vodou či vlhkem. Nejčastěji se aplikuje např. na divadelní kulisy a dekorace, u nichž nevadí zhoršené vlastnosti v omaku. Úprava se vytváří pomocí anorganických solí, které mohou po vykrytalizování tvořit na povrchu vláken tzv. závoje (používá se např. chlorid horečnatý);
- b) *úprava polotrvalá* – oproti úpravě dočasné je odolnější vůči praní, avšak svými vlastnostmi neodpovídá normám pro trvalou nehořlavou úpravu. Princip polotrvalé úpravy je založen na esterifikaci neboli reakce alkoholu s kyselinou za vzniku esteru vody, působením kyseliny fosforečné nebo hydrogenfosforečnanu amonného na celulózu za přítomnosti dusíkatých sloučenin, např. močoviny.
- c) *úprava trvalá* – je dle norem stálá v praní v alkalické i neutrální lázni, odolná vůči chemickému čištění chlorovanými i nechlorovanými uhlovodíky. Základem úprav jsou sloučeniny fosforu, zároveň však musí být nezávadné a netoxické pro lidské tělo. [2]

1.8 Zkoušky hořlavosti

S rostoucím počtem nehořlavých úprav se zvyšuje i potřeba jejich ověření, z tohoto důvodu se klade čím dál větší důraz na přesnost zkoušek, jejich opakovatelnost a pokud možno co největší shoda laboratorního testování s průběhem hoření v běžném prostředí.

Oblast využití textilie určuje i testovací metodu, např. při použití textilie ve svislém stavu (jako jsou dekorační textilie, závěsy, záclony) je vhodné zařadit testování svislé. Naopak podlahové krytiny, ubrusy a další vodorovně situované

materiály testujeme metodou vodorovnou. Prostorové uspořádání vzorků pro testování podmínek zapálení a hoření jsou 4:

- *vodorovné (horizontální)* – nejlépe opakovatelná, protože rychlost šíření plamene je nejnižší. Zároveň je to jediná zkouška, při které se neobjevuje tzv. komínový efekt, což je stoupání ohřátého vzduchu odspoda nahoru. Po upnutí zkušebního vzorku do rámečku se nejdříve testuje doba zážehu a to tak, že se zápalný zdroj přikládá zespodu k textilii na stále delší intervaly do doby, než materiál vzplane. Při této metodě je rozlišení zážehu nejpřesnější, následně se textilie zapálí kolmo přiloženým plamenem;
- *svislé (vertikální)* – nejhůře opakovatelná z důvodu nejrychlejšího šíření plamene. Ohřátý vzduch a vyzařující teplo stoupá odspoda nahoru, a proto je opakovatelnost výsledků dobrá pouze u obtížně zápalných a hořlavých materiálů. Zkušební vzorek je upnut do rámečku ve vertikální poloze, pod spodní hranu textilie je vložen kahan po předem definovanou dobu a následně se vyhodnocuje čas do zhasnutí plamene, zuhelnatělá délka vzorku atd.;
- *šikmé* – u snadno zápalných a hořlavých materiálu je reprodukovatelnost lepší než u svislého uložení vzorku. Při postupném snižování úhlu náklonu vzorku se snižuje i rychlost šíření plamene až do úplného vyrovnání, kde je rychlost nejnižší, jak již bylo zmíněno výše. Nejčastěji se aplikuje náklon 45° nebo 60° z důvodu zajištění opakovatelnosti;
- *obloukové* – velmi dobře opakovatelné. Vzorek se napne na obloukovou podložku, která je označena stupni od 0° do 180° a k hraně textilie se dospodu přiloží plamen. Díky upínacímu oblouku se při šíření plamene vystřídají všechny polohy vzorku, proto je tato metoda nejvíce podobná praktickému využití. [9]

1.9 Sdílení tepla

Sdílené teplo je označováno Q a vyjádřeno jednotkou Joule [J]. Obor části fyzikální termiky, zvané termodynamika se zabývá přenosem tepla mezi soustavou T_s [K] a jejím okolím T_o [K], jehož cílem je vyrovnání teplotních rozdílů mezi nimi. Aby mohlo teplo přecházet z jedné látky na druhou, je nutná existence teplotního

rozdílu mezi nimi, zároveň teplo přechází vždy samovolně z teplejší látky na chladnější látku, nikdy ne opačně. V ideálním případě tzn. beze ztrát, je teplotní úbytek teplejšího tělesa roven přírůstkem teploty u tělesa chladnějšího. To vyjadřuje kalorimetrická rovnice (2).

$$dQ = m c_j dT_s \quad (2)$$

Pravá strana rovnice dQ vyjadřuje množství tepla dodaného nebo odevzdaného, m [kg] je hmotnost soustavy, c_j je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a dT_s je změna teploty [$^{\circ}\text{C}$]. Měrnou tepelnou kapacitu jednotlivých látek lze najít v tabulkách, hodnoty vybraných látek jsou v tabulce 5. [15]

Tab. 5: Měrné tepelné kapacity vybraných látek [16]

| Materiál | Měrná tepelná kapacita [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] |
|--------------|--|
| Polyamid 6 | 1,6 |
| Akrylonitril | 1,4 |
| Polyester | 1,5 |
| Polypropylen | 1,9 |

1.10 Způsoby sdílení tepla

Z fyzikálního hlediska podstaty dějů je možné rozlišovat tři mechanismy přenosu tepla:

- **sdílení tepla vedením (kondukcí)** probíhá typicky v pevných látkách, za určitých podmínek i v některých kapalinách a plynech. Přenos tepla je transportem kinetické energie z teplejších a rychleji kmitajících molekul na sousední chladnější, pomaleji kmitající molekuly konáním postupného pohybu, rotačního anebo kmitavého. Intenzita pohybu se odvíjí od teploty látky, molekuly mající nejvyšší rychlosti posunu jsou v nejteplejších látkách. Naopak teoretická teplota, při které se molekuly přestávají pohybovat je absolutní 0 K (tj. -273°C). Při konstantní teplotě v průběhu času je teplotní pole ustálené neboli stacionární.

Pokud je teplota funkcí času, pole je nestacionární, tedy neustálené. Pro zjištění průběhu průtoku tepla v pevných látkách se využívá Fourierova rovnice (3).

$$\bar{q} = -\lambda \operatorname{grad} T \quad (3)$$

Základní Fourierův zákon vedení tepla vyjadřuje, že hustota tepelného toku q [W/m^2] je úměrná gradientu teploty $\operatorname{grad} T$ [K], ale směřuje proti němu, proto je ve vzorci znaménko – před součinitelem tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]. [17]

- **sdílení tepla prouděním (konvekci)** probíhá pouze v kapalných a plynných látkách. Přenos tepla je způsoben ohřátím nebo ochlazením vzduchu, které následně vyvolává pohyb částic a to zapříčiňuje, že molekuly s vyšší teplotou jsou proudem unášeny do míst s nižší teplotou a opačně. Vznik proudění je buď přirozený, nebo nucený. Konvekce vytvořená rozdílnými hustotami látek či teplotními rozdíly je označována za přirozené šíření tepla, v případě zásahu vnějších vlivů (např. při použití čerpadel, kompresorů, větráku apod.) dochází ke vzniku rozdílných tlaků, zvyšuje se intenzita výměny tepla a označuje se tedy jako konvekce nucená. Obě možnosti nastávají současně, avšak se zvyšující se rychlostí nuceného pohybu se vliv pohybu volného zanedbává. Vyjádření tepelného toku proudění je možné pomocí rovnice (4).

$$P_k = \alpha S \Delta T \quad (4)$$

Sdílení tepla prouděním je dáno vztahem, P_k tepelný tok [W] je roven součinu ΔT [K] vyjadřující rozdílu teplot povrchu tělesa a teploty okolí, α součinitele přestupu tepla [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] a S plochy povrchu [m^2], ze které je odváděno teplo. [18]

- **sdílení tepla sáláním (radiací)** se uskutečňuje u všech těles, které mají teplotu nad bodem absolutní nuly, tj. 0 Kelvinovy stupnice. Tělesa vyzařují ze svého povrchu tepelnou energii, což je vlastně elektromagnetické vlnění, šířící se přímočaře do všech směrů a na rozdíl od vedení či proudění se volně šíří i ve vakuu. Všechny objekty nejen sami vyzařují, ale také naopak i pohlcují energii vydávanou jinými tělesy, vše závisí především na teplotě, barvě a obsahu plochy daného tělesa. Při dopadu tepelného záření na povrch tělesa se část energie

odrazí, část pohltí a část projde skrz těleso. Z toho vychází rovnice (5, 6, 7, 8).

[19]

$$\text{Poměrná pohltivost } A = \frac{\text{energie pohlčená}}{\text{energie celková, dopadlá}} \quad (5)$$

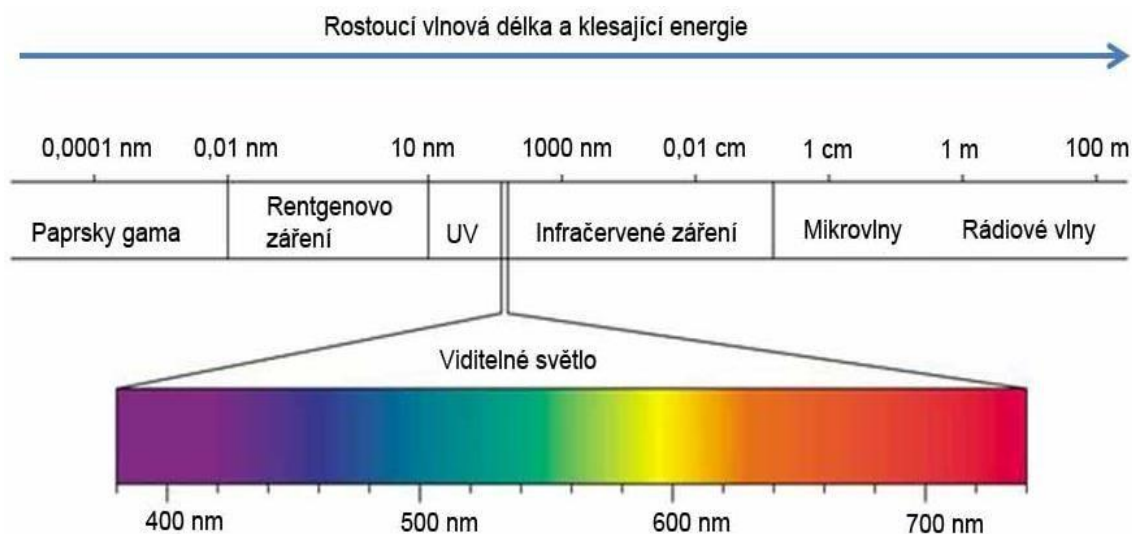
$$\text{Poměrná odrazivost } B = \frac{\text{energie odražená}}{\text{energie celková, dopadlá}} \quad (6)$$

$$\text{Poměrná propustnost } C = \frac{\text{energie prošlá}}{\text{energie celková, dopadlá}} \quad (7)$$

$$\text{Platí tedy } A + B + C = 1 \quad (8)$$

1.11 Elektromagnetické spektrum

Světelné vlny a jiné typy energií vyzařující z těles se nazývají elektromagnetické záření. Společně vytvářejí to, co je známé jako elektromagnetické spektrum. Lidské oči mohou vidět jen omezenou část elektromagnetického spektra, barevnou duhu, která je viditelná za slunečního a deštivého počasí, což je neuvěřitelně malá část všech elektromagnetických radiací, která vstupuje na zemský povrch. Tato energie, kterou je možné zaznamenat lidským okem, se nazývá viditelné světlo a stejně jako rádiové vlny, mikrovlny a vše ostatní je tvořeno elektromagnetickými vlnami. Jedná se o vzestupné a sestupné vlny elektrického proudu a magnetismu, které se mezi sebou vzájemně protínají v pravém úhlu, rychlostí světla (300 000 km za sekundu). Jak je patrné z obrázku 3, světlo, které je možné vidět, se táhne v spektru od červené (nejnižší frekvence a nejdelší vlnová délka, která je viditelná) přes oranžovou, žlutou, zelenou, modrou a indigovou až fialovou. [20]



Obr. 3: Elektromagnetické spektrum [21]

Oblast infračerveného záření (IR) je v elektromagnetickém spektru zasazena mezi viditelné záření, které má vlnové délky okolo 390 μm až 760 μm a mikrovlnné záření s vlnovými délkami 0,1 mm až 1 dm. Z toho vychází, že oblast IR spektra je přibližně v rozsahu 760 μm až 0,1 mm a můžeme jej rozdělit do několika skupin, dělení však není jednoznačné. Jedno z nejčastějších dělení je podle vlnové délky na pásma:

- blízké (0,76 μm – 5 μm)
- střední (5 μm – 30 μm)
- dlouhé (30 μm - 1 000 μm). [22]

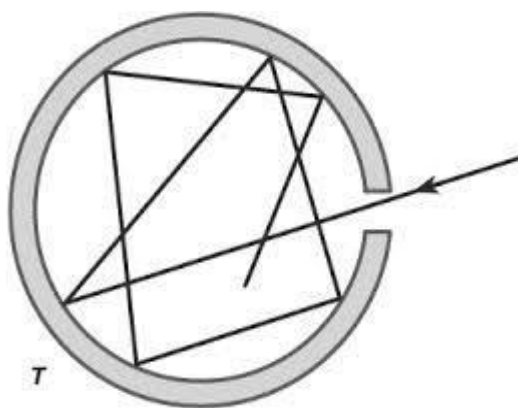
Druhá možnost rozdělení je na 5 dílčích podoblastí, které jsou:

- blízké infračervené záření; NIR (near infrared); (0,75 μm - 1,4 μm)
- IR s krátkou vlnovou délkou; SWIR (short-wavelength infrared); (1,4 μm – 3 μm)
- IR se střední vlnovou délkou; MWIR (mid-wavelength infrared); (3 μm – 8 μm)
- IR s dlouhou vlnovou délkou; LWIR (long-wavelength infrared); (8 μm – 15 μm)
- vzdálené infračervené záření; FIR (far infrared); (15 μm - 1 000 μm). [23]

1.12 Absolutně černé těleso

Úměra mezi zářivostí tělesa při určité frekvenci záření a jeho absorpční schopností, tzv. schopnost pohlcování záření je vyjádřena Kirchhoffovým zákonem o vyzařování. Spojité spektrum vyzařující z reálných těles není tedy závislé pouze na jejich teplotě, ale i na absorpčních a dalších vlastnostech. Z tohoto důvodu se těleso dokonale pohlcující veškeré elektromagnetické záření všech vlnových délek, dopadající na povrch pod jakýmkoli úhlem, označuje jako absolutně černé těleso. Záření tohoto tělesa se následně odvíjí pouze od jeho vlastní termodynamické teploty.

Pro představu je možné uvažovat dutinu s velmi malým otvorem uprostřed, jehož vnitřní plocha je v černé, matné barvě. Při průchodu záření otvorem do dutiny se po několika opakovaných odrazech úplně pohltí, viz obrázek 4, z otvoru pak vyzařuje pouze tepelné záření, které je emitované stěnami výdutě. Tato malá díra dutiny se následně chová jako povrch absolutně černého tělesa. [24]



Obr. 4: Vyzařování černého tělesa [25]

Z Kirchhoffova zákona vychází, že pokud absolutně černé těleso zcela pohlcuje záření ($\alpha = 1$), povrch tohoto tělesa má ideální hodnotu emisivity, tj. $\varepsilon = 1$. V reálném prostředí absolutně černé těleso sice neexistuje, avšak jeho vlastnostem se velmi blíží vlastnosti těles, které jsou na povrchu pokryty sazemi či tiskařskou černí ($\alpha = 0,99$). Pro popis interakcí okolo absolutně černého tělesa se používají tyto zákony:

Stefan – Boltzmannův zákon, definovaný (9), vyjadřuje intenzitu vyzařování černého tělesa M_e [W m^{-2}], úměrnou čtvrté mocnině T , což je termodynamická teplota

a Stefan – Boltzmannově konstantě označované σ s přibližnou hodnotou $5,67 * 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$. [26]

$$M_e = \sigma T^4 \quad (9)$$

Wienův posunovací zákon vyjadřuje posun spektrální hustoty intenzity vyzařování absolutně černého tělesa. S narůstající teplotou se maximální hodnota posouvá blíže kratším vlnovým délkám. Wienův vztah (10) vyjadřuje vlnovou délku λ_m , při níž je vydáváno maximum záření. Wienova konstanta potřebná pro výpočet má hodnotu $b = 2,898 \text{ [mmK]}$, T udává termodynamickou teplotu [K]. [19]

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (10)$$

Planckův zákon (11) říká, že černé těleso skládající se z velkého množství oscilátorů. Není schopné vydávat či pohlcovat energii záření v libovolném množství, ale jen v daném rozsahu – kvantech.

$$M_{e\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (11)$$

Vyjadřuje vazbu mezi spektrální intenzitou záření černého tělesa $M_{e\lambda} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$, Ludolfovou konstantou $\pi = 3,1415$, rychlostí světla $c = 3 * 10^8 \text{ m s}^{-1}$, Planckovou konstantou $h = 6,626 * 10^{-34} \text{ J}$, délkou vlny $\lambda \text{ [m]}$ a termodynamickou teplotou $T \text{ [K]}$. Dále je nutné znát hodnotu Boltzmannovy konstanty $k = 1,38 * 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. [27]

1.13 Emisivita

Důležitým parametrem při měření infračerveným teploměrem je emisivita (12). Bezrozměrná veličina s označením ε vyjadřuje schopnost tělesa vyzařovat teplo a vychází tedy z poměru intenzity dvou veličin. Intenzita vyzařování reálného tělesa

M [W m^{-2}] ku intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa M_0 [W m^{-2}] při stejné teplotě.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda} \quad (12)$$

Zjednodušený výpočet po rozepsání vyjadřuje integraci emisivity $\varepsilon(\lambda, T)$, což je funkce vlnové délky a teploty a hodnoty $M_{0\lambda}$ udávající spektrální hustotu intenzity vyzařování černého tělesa. [28]

Výsledná hodnota emisivity se pohybuje v rozmezí od 0 do 1, přičemž $\varepsilon = 1$ je pouze teoretická hodnota pro absolutně černé těleso, které v reálném světě neexistuje. Ostatní tělesa mají hodnotu nižší, tedy $\varepsilon < 1$. V termodynamickém pojetí můžeme taková tělesa označit místo černých za „velmi tmavé“ s emisivitou přibližně 0,9. Naopak hodnoty desetkrát menší, okolo 0,1 mají čisté povrchy z kovu.

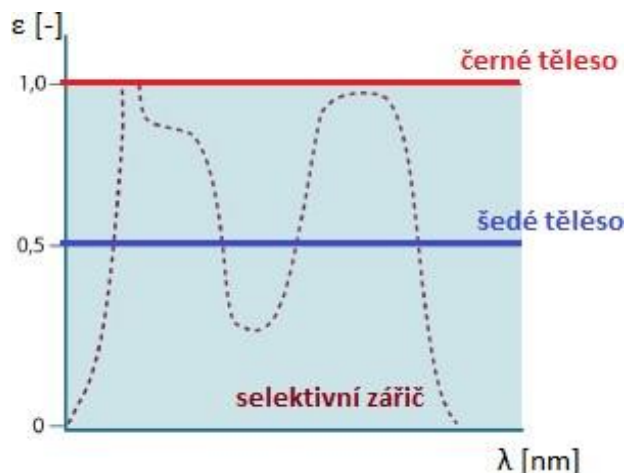
Emisivita není konstantou, ale odvíjí se od mnoha faktorů - např. teploty, vlnové délky, opravování povrchu, barvy atd. Hodnoty se liší pro každý materiál, emisivitu většiny povrchů je možné najít v tabulkách – vybrané materiály jsou uvedeny v tabulce 6. [29]

Tab. 6: Emisivita vybraných materiálů [30]

| Materiál | Hodnota emisivity |
|-------------------|-------------------|
| Sklo | 0,92 |
| Uhlík, čištěný | 0,8 |
| Zlato, leštěné | 0,02 |
| Lak, černý, matný | 0,97 |
| Lampová čern | 0,96 |
| Papír, bílý | 0,93 |
| PVC | 0,91 – 0,93 |
| Polypropylen | 0,97 |
| Voda | 0,96 |
| Textilie | 0,90 – 0,95 |

Pokud emisivita tělesa nezávisí na vlnové délce, se změnou vlnové délky se tedy nemění, viz obrázek 5, označuje se jako šedé těleso. V praxi stejně jako černé těleso

neexistuje, přesto je možné některá tělesa pro zjednodušení za šedá považovat. Selektivním zářičem se nazývají všechna reálná tělesa, která mají hodnotu emisivity mezi 0 až 1 a jsou závislá na vlnové délce. [29]



Obr. 5: Závislost emisivity na vlnové délce [31]

1.14 Infračervená termografie

Obor infračervená termografie se věnuje zkoumání bezkontaktního měření teploty na povrchu materiálů. Při měření se využívá elektromagnetického záření, vydávaného tělesem, a to zejména v oblasti infračerveného záření. Termografie tedy dovoluje nejen vidět neviditelné záření, ale i zaznamenávat a vyhodnocovat. Rozšiřuje tak sílu lidského oka za hranice jeho vnímavosti. Neviditelné záření vydávané různými objekty, které nelze vnímat pouhým okem se mění na rozpoznatelné zprávy, jenž přenáší optoelektronický detekční systém. [32]

Teploměry či kamery pro měření tepelného záření jsou pasivní zobrazovací přístroje, které nejsou závislé na množství světla v okolí, tzn. nepotřebují žádné osvětlení, přisvěcovací prostředky apod. Výstupem z infrakamery jsou termogramy, zachycující nejen konečnou teplotu měřeného objektu, ale i samotný vývoj teploty v průběhu měření.

Spojitost mezi teplotou materiálu a jeho intenzitou záření popisuje výše zmíněný Planckův zákon. Po rozšíření kamer pro detekci infračerveného záření se rozvinul i obor termografie. [33]

1.15 Princip funkce infrateploměru

Pro bezdotykové měření se využívá infrateploměrů, které měří teplotu ve vymezené oblasti a nabízí číselný výstup přímo na displeji teploměru nebo po převodu do požadovaného formátu na počítači. Infračervené teploměry jsou dostupné v širokém spektru konfigurací optiky, elektroniky, technologií, velikostí a ochranných krytů. Přesto mají všechny infrateploměry společné základní proměnné a to vstup IR energie a výstup elektronického signálu. [34]

Toto základní schéma je složeno ze shromažďování informací z optiky, čoček anebo optických vláken, na které skrz atmosféru dopadá tepelné záření z měřeného objektu, viz obrázek 6, dále spektrální filtrace na maticového detektoru, v němž je záření převáděno na elektrický signál. Dynamické zpracování probíhá pomocí mnoha úkonů, mohou se shrnout jako zesílení signálu, tepelná stabilizace, linearizace a úprava signálu. Obyčejné sklo je použitelné pro krátké vlnové délky, křemík se využívá pro střední rozsah vlnových délek a sulfid zinečnatý nebo germanium pro rozsah délek 8 μm - 14 μm . Optická vlákna jsou použitelná pro pokrytí oblasti 0,5 μm - 5,0 μm .

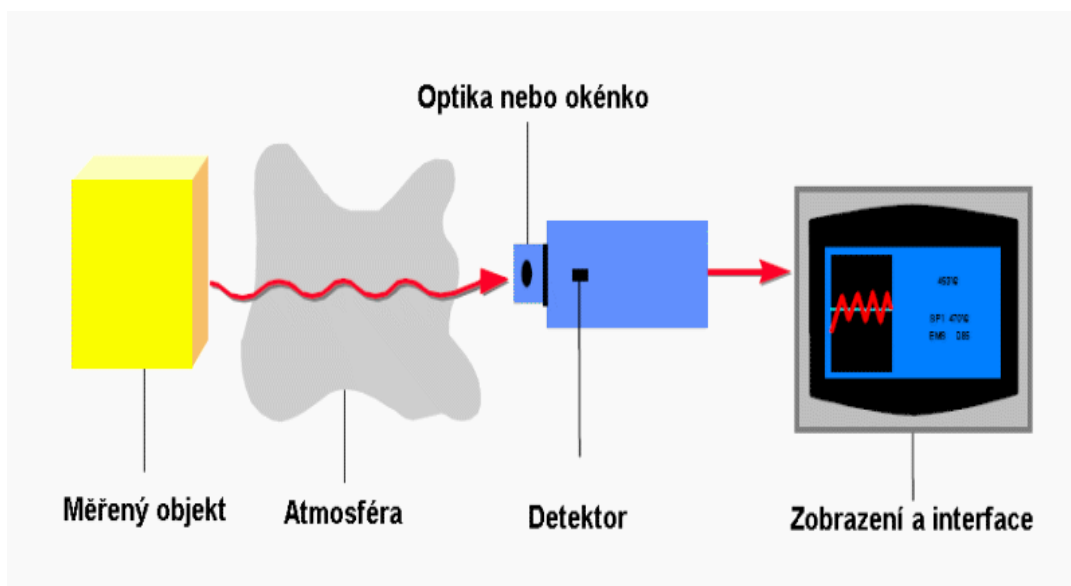
Zaměřování je dalším optickým faktorem. Mnoho senzorů postrádá tuto schopnost, objektiv je zarovnan s povrchem a měří pouze povrchovou teplotu. To funguje u velkých cílů, např. papíru, kde přesnost není vyžadována. U malých cílů se používají optiky s malým zaměřovacím bodem a u vzdálených optických přístrojů, používaných při dálkovém monitorování, existují možnosti vizuálního zaměřování, tj. zaměřování světlem a zarovnání laserem.

Selektivní spektrální filtrování běžně používá filtry s krátkou vlnovou délkou pro aplikace s vysokou teplotou ($> 537\text{ }^{\circ}\text{C}$) a filtry s dlouhou vlnovou délkou pro nízké teploty ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). To odpovídá distribučním křivkám černého tělesa a existují zde některé technologické výhody, např. při vysoké teplotě tedy krátké vlnové délce se používá

velmi tepelně stabilní křemíkový detektor, který minimalizuje teplotní chybu způsobenou změnami emisivity.

Pro maximalizaci citlivosti snímače se používá řada detektorů. Většina detektorů je buď fotovoltaiická neboli záření, které dopadá na prostorový náboj, excituje nosiče a vytváří tak napětí. Další nejčastější jsou detektory fotokonduktivní, což znamená, že dopadající záření vyvolá změnu teploty, která dále zapříčiní změnu odporu, a tím je zajištěna přeměna na elektrický signál. Tyto rychle reagující, vysoce citlivé detektory překonávají tepelný posun mnoha způsoby, např. pomocí obvodů teplotní kompenzace (termistory), regulací teploty, automatického nulového obvodu a izotermickou ochranou. Nejčastěji se využívá tepelný detektor, který mění teplotu díky dopadu elektromagnetického záření.

Uvnitř IR teploměru je zpracován nelineární výstupní signál detektoru v řádu $100\ \mu\text{V}$ - $1000\ \mu\text{V}$. Signál je zesílen 1000x, regulován a linearizován a konečný výstup je lineární signál mV nebo mA. Trendem je výstup 4 mA - 20 mA, který minimalizuje rušení elektrického signálu okolním prostředím. [35]



Obr. 6: Průběh bezdotykového měření [34]

1.16 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty

IR teploměry jsou ideální pro měření teploty pohyblivých cílů, aniž by protínaly či jinak ovlivňovaly proces. Jsou také ideální pro měření materiálů s velmi vysokými teplotami nebo nebezpečnými vlastnostmi. Infračervené teploměry mohou měřit materiály v průměru 0,025 palce (přibližně 0,06 cm) a jsou schopny reagovat na změny teploty řádově za 10 ms. Další výhody IR teploměrů jsou:

- nevyžadují fyzický kontakt s materiálem, jehož teplota se měří;
- mohou měřit na obtížně dostupných místech;
- mohou sledovat teploty malých cílů nebo měřit průměrnou teplotu v široké oblasti;
- měří mnohem vyšší teploty než dotykové teploměry.

Nevýhody bezdotykových IR teploměrů jsou:

- dražší a křehčí než dotykové teploměry či odporové teplotní detektory;
- při špatném nastavení emisivity, mohou být výsledky nepřesné;
- měřený materiál musí být v zorném poli teploměru (kouř či prach přesnost snižují);
- nutnost ochrany čidla proti kapalinám či prachu;
- měření pouze povrchové teploty objektu. [36]

2. Experimentální část

Tato část práce je zaměřena na přípravu materiálů pro experiment, popisu použitých přístrojů, zjištění informací o šíření plamene, jeho rychlosti, vyzařovaném IR spektru, a metod vyhodnocování.

2.1 Použité materiály a chemikálie

Základem této diplomové práce bylo testování co nejvíce textilií s různou plošnou hmotností, materiálovým složením, tloušťkou a dalšími vlastnostmi. Pro účely měření byly vybrány textilie uvedené v tabulce 7. Většina materiálů byla k dispozici v laboratořích KMI. Základní vlastnosti materiálů, důležité pro experiment hoření, jsou popsány níže.

Bavlna

Přírodní vlákna o průměrné tloušťce cca 12 μm - 40 μm pochází ze semen bavlníků, dosahují délky 10 mm až 60 mm v závislosti na původu a kvalitě zpracování. Teplo způsobuje žloutnutí při 120 °C, následné hnědnutí při 200 °C a při kontaktu s ohněm hoří rychle a zanechává jemný popel šedé barvy, stejně jako papír. [37]

Vlna

Živočišné vlákno ze zkadeřené srsti ovčí, dosahující tloušťky 6 μm až 120 μm , délky 50 mm až 450 mm. Při kontaktu s teplotou 100 °C začíná křehnout a po dosažení 130 °C se rozkládá. Za teploty 205 °C až 300 °C hoří nebo uhelnatí v závislosti na délce působení žáru a obsažené vlhkosti. Samotné hoření probíhá velmi obtížně, vyskytuje se při něm zápach pálicí se rohoviny a po oddálení zdroje zapálení vlna přestává téměř okamžitě hořet a zanechává křehký, lesklý odpad. [38]

Polyester

Nejběžnější syntetické vlákno, používané nejen samostatně, ale i do směsí. Teplota zesklnění se pohybuje v rozmezí 70 °C až 80 °C. Při zvýšení teploty na hranici 235 °C až 248 °C dochází k měknutí vláken a samotné tání nastává při 248 °C až 256 °C, což dělá z polyesterových vláken jedny z nejvíce odolných vláken. Při vložení do ohně se vlákna taví a tvoří kapky zčernalého polymeru, který odkapává a nese s sebou ostrý aromatický zápach. Do dohoření zůstává z polyesteru černá beztvářá hmota. [38]

Viskóza

Syntetické vlákno, jako stříž se vyrábí v různých délkách s odlišnými vlastnostmi, např. lesklá, matná, hladká, obloučková atd. Vlákna je možné označit za netavitelná, ale snadno hořlavá, hoří i po oddálení plamene. Zápach vydávaný při hoření je stejný jako u bavlny, tedy je cítit po spáleném papíru, po dohoření zůstává popel šedobílé barvy. Nízká odolnost vůči vyšším teplotám, sráží se a je vysoce hořlavá. Teplota rozkladu je okolo 175 °C až 205 °C. [38]

Acetát

Hlavní vlastností acetátových vláken je termoplasticita. Z hlediska kontaktu s ohněm patří mezi tavitelné, lehce se zapalující vlákna, která hoří i po oddálení plamene. Zápach vznikající při hoření je ostrý a kyselý. Teplota měknutí acetátových vláken je 205 °C až 235 °C, tání nastává při 255 °C až 260 °C. Triacetátová vlákna mají tepelné vlastnosti podobné, jejich měknutí začíná u teploty 220 °C až 250 °C, za bod tání je označování teplota 300 °C. [37]

Polypropylen

Patří do skupiny polyolefinových vláken. Teplotu zesklnění mají menší než 19 °C, měknutí nastává při dosažení hodnoty 145 °C až 155 °C, samotné tání

pak připadá na teplotu 160 °C až 170 °C. Vlastností polypropylenových vláken je velmi dobrá tepelná izolační schopnost. Z pohledu hořlavosti se vlákna označují za tavící, snadno zapalující. Po procesu hoření zůstává beztvářá tavenina tmavé barvy. [39]

Polyamid

Chemicky modifikovaná vlákna s typickou nízkou teplotou měknutí 170 °C až 180 °C. K zesklnění dochází při 50 °C až 60 °C a bodem tání se vyznačuje hodnota 215 °C. Snadno se zapalující vlákna jsou tavitelná a po oddálení plamene mají tendenci zhasínat, při hoření je možné rozpoznat aromatickou vůni. Proces hoření zanechává odkapávající tmavé kuličky taveniny, které po vychladnutí zatvrdnou. [38]

Polyakrylonitril

Vysoce tepelně izolační polyakrylonitril se vyrábí nejčastěji ve formě stříže nebo kabelu. Jeho teplota zesklnění je přibližně 50 °C až 100 °C za sucha, avšak ve vodě se snižuje na 30 °C až 70 °C. Teplotu měknutí nemá definovanou a rozklad probíhá při 250 °C až 360 °C. [38]

Tab. 7: Souhrn informací o použitých textiliích

| Zn. | Vazba | Materiálové složení | Úpravy textilií | Plošná hmotnost [g/m ²] | Tloušťka materiálu [mm] |
|-----|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 01 | plátno | CO | bělené, mercerované | 146 | 0,30 |
| 02 | plátno | CO | bělené, mercerované | 110 | 0,33 |
| 03 | podélný ryps | CO | režné, nebělené | 158 | 0,40 |
| 04 | kepr hrotový | CO | režné, nebělené | 268 | 0,56 |
| 05 | atlas pětivazný | CO | režné, nebělené | 214 | 0,53 |
| 06 | plátno | PES | režné, nebělené | 70 | 0,12 |
| 07 | plátno | VS | prané, sušené | 74 | 0,11 |
| 08 | kepr třívazný | PES | režné, nebělené | 92 | 0,18 |
| 09 | plátno | PES | režné, nebělené | 261 | 0,53 |
| 10 | plátno | PP | režné, nebělené | 157 | 0,49 |
| 11 | plátno | PES | režné, nebělené | 178 | 0,43 |
| 12 | plátno | CO | režné, nebělené | 113 | 0,24 |

| | | | | | |
|----|---------------|----------------|---------------------|-----|------|
| 13 | plátno | CO | bělené, mercerované | 137 | 0,33 |
| 14 | plátno | PES | režné, nebělené | 97 | 0,19 |
| 15 | plátno | PES | režné, nebělené | 69 | 0,17 |
| 16 | plátno | CA hedvábí | režné, nebělené | 112 | 0,19 |
| 17 | plátno | CTA | režné, nebělené | 128 | 0,35 |
| 18 | plátno | PP | režné, nebělené | 125 | 0,40 |
| 19 | plátno | PES | režné, nebělené | 125 | 0,32 |
| 20 | plátno | PA | režné, nebělené | 130 | 0,31 |
| 21 | plátno | VS | režné, nebělené | 122 | 0,24 |
| 22 | plátno | CO | režné, nebělené | 111 | 0,24 |
| 23 | plátno | WO | režné, nebělené | 153 | 0,35 |
| 24 | kepr třívazný | PES/CO (60/40) | mercerované | 221 | 0,51 |
| 25 | kepr třívazný | PES/CO (65/35) | režné, nebělené | 186 | 0,32 |
| 26 | plátno | PAN | režné, nebělené | 174 | 0,48 |
| 27 | kepr třívazný | PP/CO (65/35) | režné, nebělené | 128 | 0,44 |
| 28 | kepr třívazný | PP | režné, nebělené | 211 | 0,82 |

Plošné hmotnosti všech uvedených vzorků byly zjištěny pomocí laboratorní váhy a následně přepočteny na hodnoty pro m². Tloušťky uvedené v tabulkách jsou dány průměrem 3 měření na tloušťkoměru při tlaku 1 kPa.

2.1.1 Úprava textilních materiálů

Při úpravě textilií, pro testování změny rychlosti hoření, bylo využito dvou postupů úpravy. Dva vzorky byly pozlaceny metodou naprašování a na další dva vzorky byla nanесena lampová čern. Tabulka 8 obsahuje informace o materiálech po nanесení zlata a lampové černi.

Zlato

Těžký kov, téměř třikrát těžší než železo, s měrnou hmotností 19,29 g/cm³ je odolný kyselinám a solím. Žlutý, lesklý prvek, stálý na vzduchu se vyskytuje v přírodě a vyniká dobrou tažností a kujností. Teplota tání je velmi vysoká

a to 1 063 °C. Díky dostupným informacím o nízké emisivitě 0,02 viz tabulka 4, bylo zlato použito jako možný zpomalovač hoření. [40]

Aplikace pozlacení

SCD 030 je systém pro nanášení naprašováním, určený pro tenké filmy na materiálech menších rozměrů. Morfologie a tloušťka jsou řízeny uživatelem pomocí výkonu, tlaku, pracovní vzdálenosti. Tloušťka může být řízena časem nebo krystalovým monitorem. Celý proces trvá asi půl hodiny. Biologické a teplotně citlivé vzorky jsou pokryty rozprašováním při větší pracovní vzdálenosti a při nižším proudovém rozprašování, a proto budou mít delší čas rozprašování. [41]

Vzorek se vloží do zkušební komory, po spuštění se přes dávkovací ventil pomocí hrubovacího čerpadla začne přivádět argon. Několikanásobné propláchnutí komory argonem usnadňuje vyčerpání nežádoucích plynů, zejména vodní páry. Díky propláchnutí by atmosféra v komoře měla obsahovat co možná nejčistší argon. Po vyrovnání pracovního tlaku v komoře na 0,05 mbar až 0,1 mbar se spustí proces naprašování. Při spuštění rozprašování se na nanášený materiál (katodu) aplikuje vysoké napětí, to vytvoří pole vysokého napětí mezi materiálem (v tomto případě zlato) a zkušebním vzorkem (anodou). Magnetový systém nutí volné elektrony do spirálového pohybu v poli vysokého napětí, kde se srazí s atomy argonu. Kaskádový proces způsobuje vzplanutí výboje (plazmatu), pozitivně nabitě argonové ionty zrychlují, dopadají na katodu a vytváří atomy kovu, které spolu s molekulami plynu tvoří difuzní mrak. Atomy kovu z tohoto mraku zasahují vzorek ze všech stran a kondenzují na něm. Vzorek je pak pokryt rovnoměrným, tenkým kovovým filmem, který je elektricky vodivý, viz obrázek 07. [42]

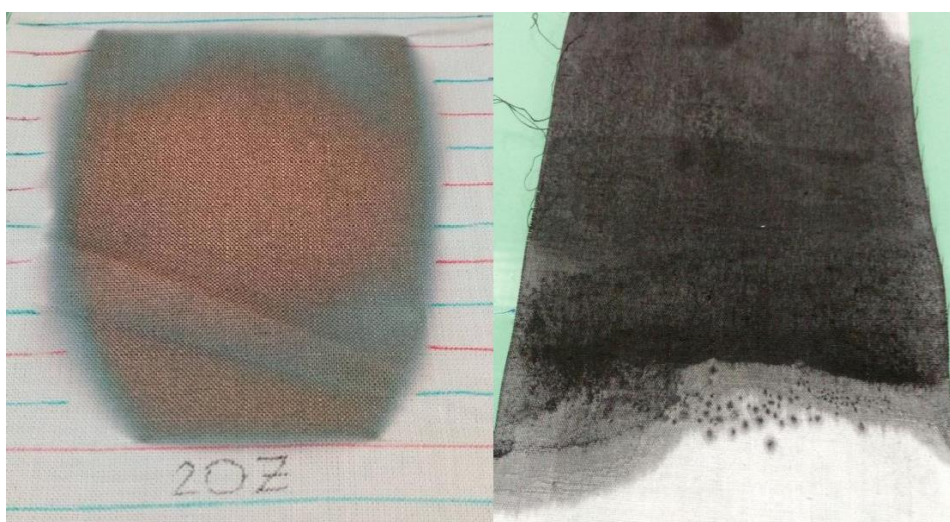
Lampová čern

Sloučenina je tvořena z 99 % uhlíkem, který je považován za aktivní prvek hořlaviny a je nositelem chemicky vázané energie. Při hoření uvolňuje plyny a páry, které jsou lehce zápalné, z čehož vzniká další teplo, a je předpoklad, že plamen je vyšší

a oheň se tak šíří rychleji. Tabulka 4 udává hodnotu emisivity 0,96, a proto byla čern nanesena na textilii jako případný prostředek k urychlení spalování. [43]

Aplikace lampové černi

Stejně jako u pozlacení se použila bavlněná a polyamidová textilie, na které byl nanesen roztok lampové černě (obr. 7) v koncentraci 0,2 g na 10 ml acetonu, jenž byl promísen pomocí ultrazvuku o délce působení 30 s. Pro rovnoměrný odmačk byl použit fulár a po usušení byla koncentrace černě na vzorku 0,1 g.



Obr. 7: Pozlacený vzorek (vlevo) a vzorek s nánosem lampové černi (vpravo) [vlastní zdroj]

Tab. 8: Informace o použitých textiliích po úpravách

| Zn. | Vazba | Materiálové složení | Úpravy textilií | Plošná hmotnost [g/m ²] | Tloušťka materiálu [mm] |
|-----|--------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 20č | plátno | PA | lampová čern | 130 | 0,31 |
| 20z | plátno | PA | pozlaceno | 130 | 0,31 |
| 22č | plátno | CO | lampová čern | 111 | 0,24 |
| 22z | plátno | CO | pozlaceno | 111 | 0,24 |

2.1.2 Doprovodné fólie

V rámci měření FTIR spekter byly použity folie jako doprovodné materiály. Jednalo se folie z materiálu polyamid, celofán, polyester, polypropylen – vlastnosti všech polymerů jsou popsány výše. Základní materiálové informace jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9: Informace o použitých doprovodných foliích

| Materiálové složení | Plošná hmotnost [g/m ²] | Tloušťka materiálu [mm] |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| PA 6 | 29 | 0,026 |
| Celofán | 36 | 0,025 |
| PES | 113 | 0,090 |
| PP | 9 | 0,010 |

2.2 Použité přístroje, pomůcky a metody

Pro ověření plošné hmotnosti vzorků byla použita laboratorní váha, tloušťka textilií byla zjištěna pomocí tloušťkoměru Schmidt, k určení hodnot prodyšnosti byl využit přístroj FX 3300, pozlacení vzorků proběhlo na přístroji SCD 030, měření průchodu IR záření na spektrofotometru Nicolet iZ10 a iS50, pro následné měření infrateploměr GIM 3590. Přístroje jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.2.1 Měření prodyšnosti textilie

Přístroj FX 3300 měří prodyšnost/propustnost textilií, pracuje automaticky a digitálně. Silné, tlumené vakuové čerpadlo čerpá vzduch skrz jednu výměnnou zkušební hlavici s kruhovým otvorem. Pro měření je nutné vybrat vhodnou standardizovanou zkušební hlavici, která je připojena k přístroji.

Vzorek se upne na otvor zkušební hlavy, s rozměrem 20 cm², stlačením upínacího ramena směrem dolů, následně se automaticky spouští vakuové čerpadlo.

Dopředu zvolený zkušební tlak (v případě této diplomové práce, byl použit tlak 100 Pa) se automaticky udržuje a po několika sekundách se hodnota propustnosti vzduchu zkoušeného vzorku zobrazí na digitální obrazovce, v předem zvolené měrné jednotce, nejčastěji $l/m^2/s$ nebo mm/s . Stisknutím upínacího ramena podruhé se zkušební vzorek uvolní a vakuové čerpadlo je vypnuto. Princip měření je tedy založen na tlakovém rozdílu mezi oběma povrchy materiálu a následném změření průtoku vzduchu.

Dlouhé upínací rameno o délce 50 cm umožňuje obsluhu provádět měření velkých vzorků, aniž by se textilie museli stříhat na malé zkušební vzorky. Pomocí dvou prodlužovacích desek na stranách může být pracovní plocha přístroje zvýšena na 120x60 cm. Provoz přístroje je velmi jednoduchý. [44]

2.2.2 Měření teploty pomocí IR teploměru

Infračervený teploměr GIM 3590 je optoelektronické čidlo. Teplotu povrchu vypočítává na základě vyzařovaného infračerveného záření z objektu. Nejdůležitější vlastností infračerveného teploměru je, že umožňuje uživateli měřit objekt bezkontaktně. V důsledku toho tento výrobek pomáhá bez obtíží měřit teplotu nepřístupných nebo pohybujících se objektů. Infračervený teploměr se v podstatě sestává z následujících komponent:

- objektiv
- spektrální filtr
- detektor
- elektronika (zesilovač / linearizace / zpracování signálů)

Specifikace čočky rozhodujícím způsobem určují optickou dráhu infračerveného teploměru, který je charakterizován poměrem vzdálenosti ku velikosti měřeného bodu. Spektrální filtr volí rozsah vlnových délek, který je relevantní pro měření teploty. Detektor ve spolupráci se zpracovací elektronikou transformuje vyzařované infračervené záření na elektrické signály. V tabulce 10 jsou uvedeny základní technická data infrateploměru GIM 3590. [45]

Tab. 10: Specifikace inftrateploměru GIM 3590 [45]

| | |
|-------------------|--|
| Teplotní rozsah | -35 °C až 900 °C |
| Spektrum | 8 až 14 μm |
| Přesnost měření | ± 0,75 °C nebo ± 0,75 % (podle toho, která hodnota je větší) |
| Emisivita | 0,1 až 1,1 |
| Rozlišení teploty | 0,1 °C |
| Doba odezvy | 150 ms (při 95% signálu) |
| Napájení | 2x AA baterie nebo pomocí USB kabelu |
| Výdrž baterie | 5 hodin (laser a podsvícení na 50%) 10 hodin (laser bez podsvícení) |

2.2.3 Měření pohltivosti IR záření textilií

Měření folií proběhlo na FTIR spektrofotometru Nicolet iZ10 s Fourierovou transformací. Analytická technika infračervené spektroskopie se používá zejména pro identifikaci a charakteristiku struktury organických a anorganických materiálů. Zjišťuje se pohltivost různých vlnových délek infračerveného záření zkoumaným materiálem. Výsledkem je infračervené spektrum v procentech absorpance (A) či transmittance (T) na vlnové délce dopadajícího záření.

Infračervené spektrometry s Fourierovou transformací (FTIR spektrometry) pracují na základě interference spektra a hodnotí interferogram modulovaného svazku záření po průniku vzorkem. Fourierova transformace umožňuje získání klasického spektrálního záznamu. Výhodou FTIR spektrometru je dopad celého svazku záření na detektor při měření, což umožňuje realizaci pokusů, při kterých vznikají velké energetické ztráty, např. měření vzorků s velkou absorpcí nebo analýza materiálů v pevné či kapalné formě v odraženém světle, tzv. reflektanční infračervená spektroskopie. [46]

Pro měření ostatních materiálů, z důvodu jejich tloušťky, bylo využito techniky zeslabeného úplného odrazu (ATR, Attenuated Total Reflection), která je založena na totálním odrazu záření na fázovém rozhraní testovaného materiálu a testovacího krystalu tvořeného materiálem s vysokým indexem lomu.

Vzorek je díky přitlačnému mechanismu (pevná látka) případně pro své vlastnosti (kapalina) v ideálním styku s ATR krystalem, záření tak částečně

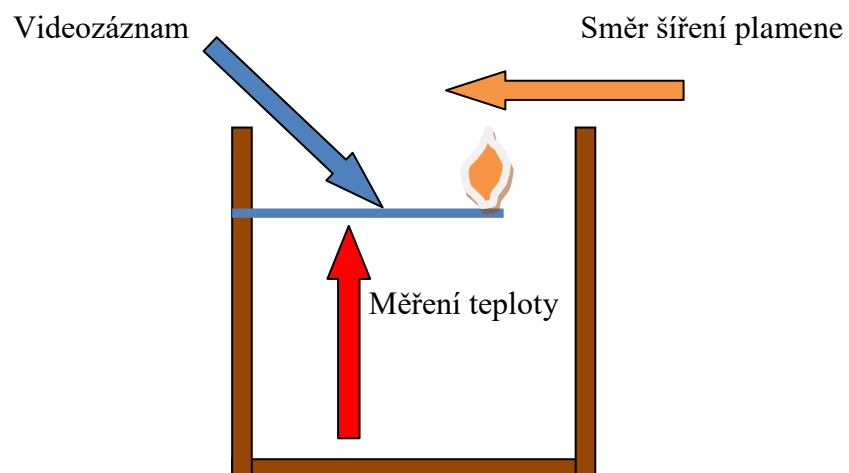
proniká do zkoumaného vzorku. Frekvence záření, která je vzorkem absorbována se v odrazu světla zeslabí. Samotné měření je ovlivněno vhodným výběrem ATR krystalu, nejčastěji se využívá ZnSe, diamant a Ge.

ATR technika měření umožňuje jednoduchou údržbu krystalu, možnost snadno měřit pevné i kapalně vzorky, stejně tak jejich minimální přípravu. Naproti tomu jako nevýhoda se jeví deformace ATR spekter na rozdíl od transmisních spekter. Měření se uskutečňuje povrchově, v hloubce 0,5 mm až 5 mm, podle vlnótu záření pronikajících evanescentních vln.

Technika ATR zapříčiňuje posun intenzity vibračních pásů a rozdíl v absolutní frekvenci. Síla naměřeného spektra se odvíjí od hloubky penetrace evanescentní vlny do materiálu v souvislosti s vlnovou délkou infračerveného záření. Při kratších vlnových délkách (vyšší vlnóčet) je tento vliv obzvlášť viditelný, protože průchod evanescentních vln vzorkem je nižší. Díky tomu je možné, že v úseku vlnótu $4\,000\text{ cm}^{-1}$ až $2\,800\text{ cm}^{-1}$ mohou chybět typické signály, pokud nebude zajištěn dostatečný počet scanů, nebude vytvořen vhodný přitlak ATR krystalu na vzorek nebo nebude nastaven správný úhel odrazu ATR krystalu. [46]

2.2.4 Zařízení pro měření textilií

Pro experiment bylo vyrobeno zařízení dle vlastního návrhu, patrného na obrázku 8. Konstrukce je z dřevotřísky (obr. 9) a skládá se ze dvou částí. Spodní část je tvořena prostorem pro infrateploměr, plochy na připevnění vzorku. Horní část spolu s držákem pro nahrávací zařízení slouží pouze jako tzv. „komín“, který zajišťuje odvod zplodin tak, aby tah digestoře, ve které bylo měření prováděno neovlivňovalo samotný experiment. Vnitřní plochy „komínu“ byly natřeny na černo, aby vykazovaly vlastnosti absolutně černého tělesa a nevstupovaly do výsledných hodnot teplot textilií. Výrobu zajistili technici fakulty textilní.



Obr. 8: Náskres zařízení pro sledování šíření plamene [vlastní zdroj]

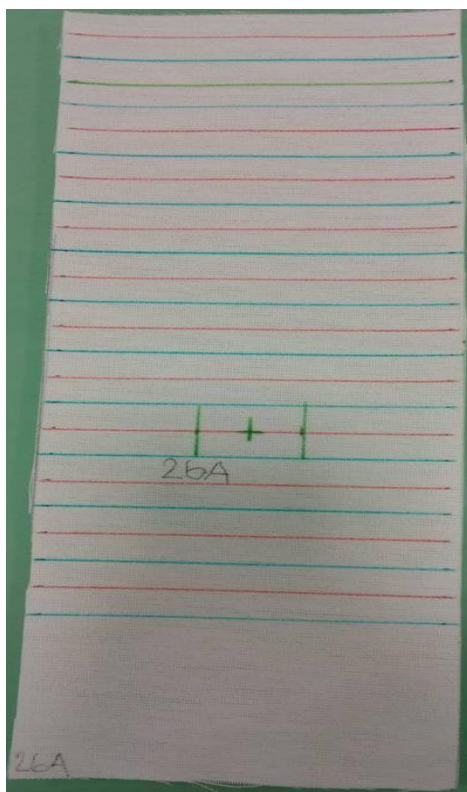


Obr. 9: Zkonstruované zařízení pro sledování šíření plamene [vlastní zdroj]

2.3 Příprava vzorků

Pro experiment bylo nutné připravit testované materiály. Tkaniny byly nastříhány na vzorky o velikosti 30x12 cm, vždy byla snaha vést stříhy po niti.

Jednotlivé vzorky byly reprodukovány ve třech kusech po osnově a ve stejném počtu po útku, v případě standardizovaných doprovodných tkanin (č. 16–23) bylo s ohledem na formát vzorků měřeno šestkrát pouze ve směru osnovy. Všechny tyto normované vzorky byly ve vazbě plátno s totožnou dostavou. Označení A, B, C určuje vzorky střižené po osnově a D, E, F po útku. Každý vzorek byl rozkreslen na 1 cm dlouhé úseky (obr. 10), pro lepší měření rychlosti šíření plamene. Jako počátek měření byla označena zelená čára vzdálená 3 cm od okraje textilie, vrchol měření byl vzdálen 14 cm od začátku měření a označen taktéž zeleně.



Obr. 10: Připravený vzorek pro spalování [vlastní zdroj]

3. Výsledky a diskuze

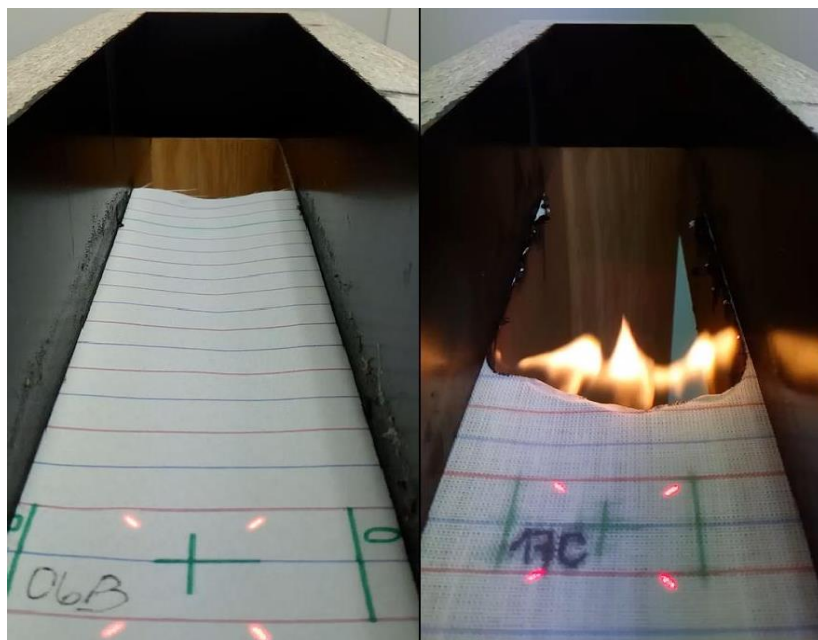
Pro přehlednost jsou všechny výsledky znázorněny graficky nebo v tabulkách. V následujících kapitolách jsou uvedeny pouze demonstrativní příklady výsledků, ostatní jsou v příloze.

3.1 Hoření textilií

Prodyšnost byla zjištěna pomocí přístroje FX 3300, každý materiál byl testován 10x, následně byly hodnoty zprůměrovány a zaznamenány do tabulky 11. Rychlost šíření a výška plamene byly dány průměrem hodnot z 6 pořízených videí se záznamem o průběhu spalování, ukázka ze záznamu je na obr. 11.

Testovaný materiál byl volně bez napnutí vložen mezi horní a spodní díl bedny, následně byla k okraji textilie přiložena hořící sirka. Měření rychlosti šíření plamene započalo ve vzdálenosti 3 cm od okraje textilie, aby bylo zajištěno ustálení plamene a jeho rychlost posunu tak nebyla ovlivněna plamenem sirky.

Výška plamene byla sledována v celém průběhu hoření a následně dána průměrnou hodnotou. Měření výšky plamene bylo testováno kolmo k textilií i pod úhlem, avšak výška plamene se mění v čase a na různých místech příliš rychle, a proto je přesné měření nemožné v obou případech. Z tohoto důvodu byla pro měření vybrána možnost uložení nahrávacího zařízení pod úhlem. Tím se předešlo nejen riziku poškození zařízení, ale zároveň nedocházelo k zakouření objektivu od zplodin spalování a nedošlo tak ke zhoršení kvality obrazu.



Obr.11: Screenshot z pořízeného záznamu se spalováním

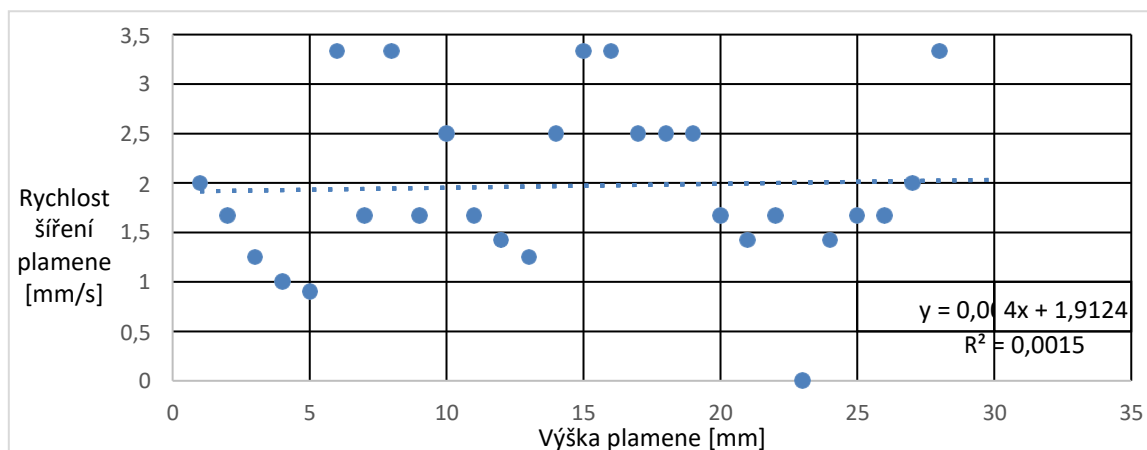
Tab. 11: Výsledné hodnoty testovaných materiálů

| Zn. | Prodyšnost [l/m ² /s] | Výška plamene h _p [mm] | Rozptyl h _p [mm ²] $\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}$ | Rychlost šíření v _p [mm/s] | Rozptyl v _p [mm ² /s ²] $\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}$ |
|-----|-------------------------------------|---|---|---|---|
| 01 | 302 | 13 | 2,8 | 2,00 | 0,06 |
| 02 | 1 253 | 17 | 1,3 | 1,67 | 0,14 |
| 03 | 535 | 16 | 1,6 | 1,25 | 0,12 |
| 04 | 88 | 16 | 2,0 | 1,00 | 0,08 |
| 05 | 89 | 15 | 1,3 | 0,90 | 0,07 |
| 06 | 56 | 16 | 0,3 | 3,33 | 0,05 |
| 07 | 290 | 7 | 5,3 | 1,67 | 0,01 |
| 08 | 70 | 17 | 0,3 | 3,33 | 0,04 |
| 09 | 25 | 29 | 0,7 | 1,67 | 0,00 |
| 10 | 280 | 22 | 1,7 | 2,50 | 0,11 |
| 11 | 332 | 18 | 3,0 | 1,67 | 0,00 |
| 12 | 909 | 16 | 1,5 | 1,42 | 0,00 |
| 13 | 643 | 13 | 2,5 | 1,25 | 0,03 |
| 14 | 206 | 17 | 0,9 | 2,50 | 0,16 |
| 15 | 217 | 16 | 0,1 | 3,33 | 0,06 |
| 16 | 345 | 30 | 0,6 | 3,33 | 0,03 |
| 17 | 2 100 | 36 | 0,9 | 2,50 | 0,06 |
| 18 | 1 203 | 40 | 1,5 | 2,50 | 0,00 |

| | | | | | |
|----|-------|----|-----|------|------|
| 19 | 2 777 | 21 | 0,5 | 2,50 | 0,11 |
| 20 | 819 | 14 | 0,6 | 1,67 | 0,00 |
| 21 | 1 383 | 10 | 0,5 | 1,42 | 0,02 |
| 22 | 828 | 15 | 0,6 | 1,67 | 0,01 |
| 23 | 423 | - | - | - | - |
| 24 | 569 | 26 | 1,1 | 1,42 | 0,03 |
| 25 | 61 | 20 | 2,2 | 1,67 | 0,05 |
| 26 | 848 | 12 | 2,1 | 1,67 | 0,14 |
| 27 | 1 407 | 80 | 4,6 | 2,00 | 0,02 |
| 28 | 952 | 15 | 1,9 | 3,33 | 0,04 |

Ačkoli je průměrná výška plamene vzorků h_p se stejným materiálovým složením podobná, jednotlivá měření jsou od střední hodnoty poměrně vzdálena. Rozptyl σ^2 výšky plamene jednotlivých sad měření v některých případech dosahuje hodnot až $5,33 \text{ mm}^2$ (variační koeficient 33 %) což značí, že i při stejných laboratorních podmínkách byly výsledné hodnoty poměrně odlišné.

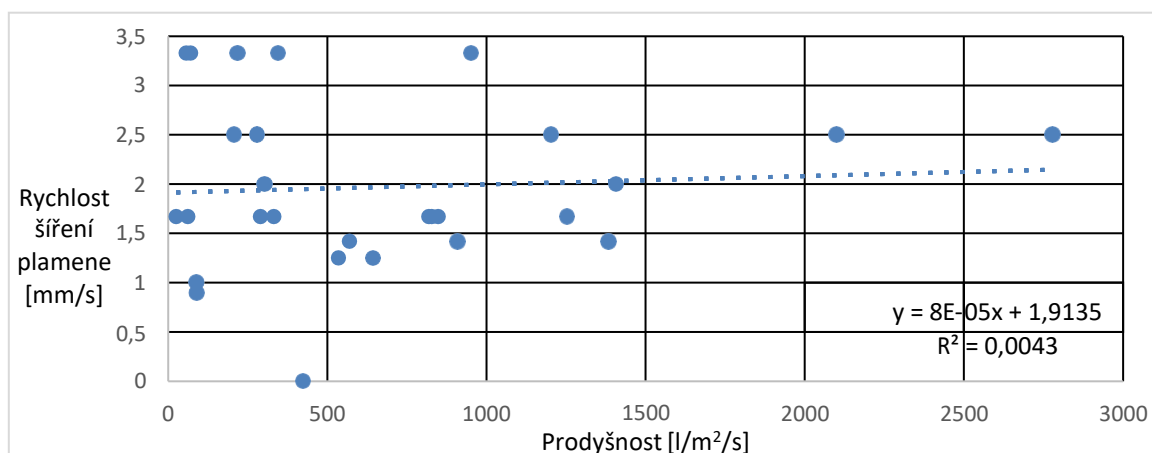
Naproti tomu rychlost šíření plamene v_p vykazuje poměrně stabilní hodnoty u jednotlivých sad měření, rozptyl σ^2 udává hodnoty maximálně okolo 0,1. Na následujících grafech je proto hodnocena závislost rychlosti šíření plamene na jednotlivých vybraných parametrech.



Obr. 12: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na výšce plamene

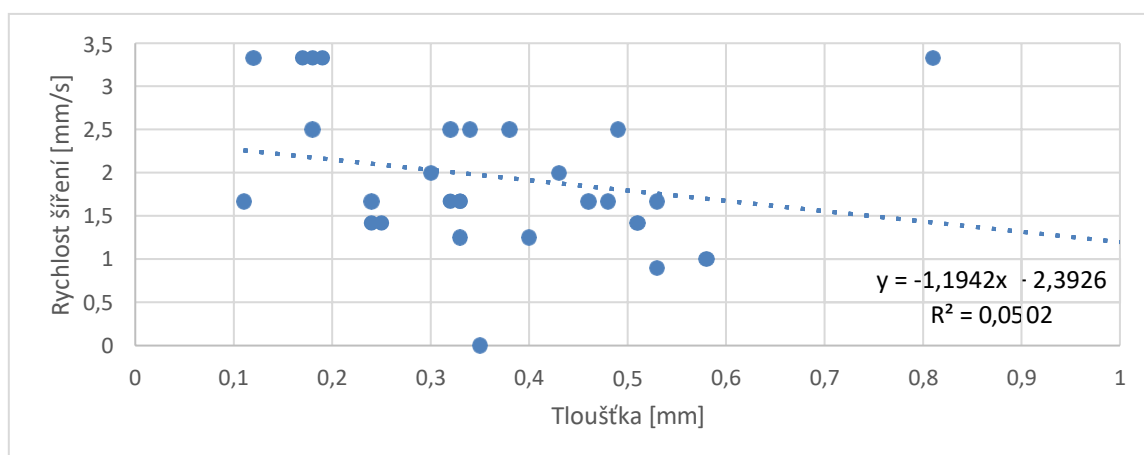
Analýza výsledných hodnot rychlosti šíření plamene a výšky plamene neprokázala žádnou souvislost mezi jednotlivými parametry, jak je patrné z grafického

vyhodnocení na obrázku 12. Původní předpoklad, že výška plamene ovlivňuje rychlost přehřívání textilie a tím i rychlost posunu plamene, byl tedy zamítnut.



Obr. 13: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na prodyšnosti materiálu

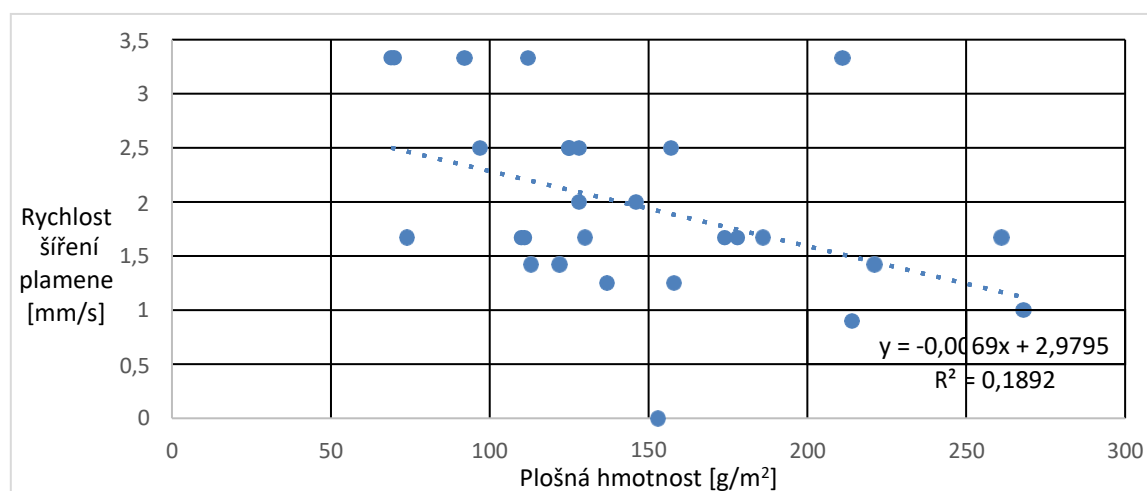
Obecně je znám fakt, že významným činitelem hoření je kyslík, bez přístupu vzduchu k místu hoření plamen zhasíná, z tohoto důvodu byla prodyšnost materiálů zařazena mezi možné faktory ovlivňující rychlost posunu plamene. Domněnka pracující s vysokou prodyšností, a tedy téměř neomezeném přístupu vzduchu k plameni nebyla prokázána. Naopak dle prvních výsledků materiál s jednou z nejnižších prodyšností hořel nejrychleji, proto byla formulována nová hypotéza a to, že díky neprodyšnosti materiálu se zplodiny a vytvářené teplo kumulují před plamenem a ohřívají tak textiliu více, díky čemuž se plamen bude šířit rychleji. Avšak jak je viditelné na obrázku 13, neexistuje žádná závislost rychlosti šíření plamene na prodyšnosti materiálu.



Obr. 14: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na tloušťce materiálu

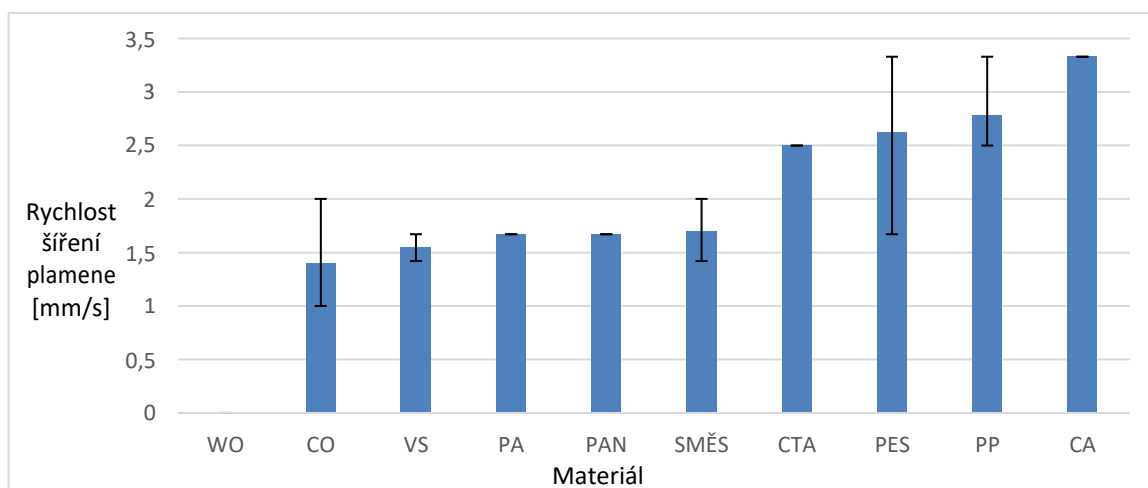
Dalšími parametry, jako případné faktory ovlivňující rychlost šíření plamene, byly určeny tloušťka materiálu a s ní částečně spojená plošná hmotnost. Předpoklad práce, že vyšší tloušťka materiálu potřebuje více času a tepla pro přehřátí textlie, aby se mohl plamen šířit, se dle grafu na obrázku 14 potvrdil pouze částečně.

Graf na obrázku 15, tedy vliv plošné hmotnosti na rychlost šíření plamene vykazuje určité náznaky závislosti oproti ostatním sledovaným parametrům. Přesto však není možné s jistotou říci, že rychlost šíření závisí na plošné hmotnosti, protože u materiálů s podobnou plošnou hmotností byly značné odchylky v jiných parametrech, které sice přímo neovlivňují rychlost hoření, jak bylo prokázáno výše, avšak mohou působit jako určitý vedlejší faktor.



Obr. 15: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na plošné hmotnosti materiálu

V rámci této práce není možné přesně definovat všechny faktory ovlivňující rychlost šíření plamene, přesto však poskytuje přínosné informace o rychlosti šíření na jednotlivých materiálech. Dle grafu na obrázku 16 je možné určit rizikovitost materiálů z hlediska požární ochrany, např. často používaný polyester je jedním z nejrizikovějších materiálů, naopak za tzv. nejbezpečnější materiál můžeme označit vlnu. Úsečky u jednotlivých materiálů označují naměřené maximum a minimum rychlostí šíření plamene.



Obr. 16: Graf průměrné rychlosti šíření plamene jednotlivých materiálů

3.2 Vliv úpravy IR absorpce textilie na hoření

V rámci části experimentu byl na 4 vzorky aplikován nános lampové černi a zlata, pro ověření možnosti ovlivnit absorpci IR záření textilií a tím zvýšit či snížit rychlost šíření plamene. V tabulce 12 jsou výsledné hodnoty z videozáznamu se spalováním.

Tab. 12: Výsledné hodnoty testovaných materiálů po úpravách

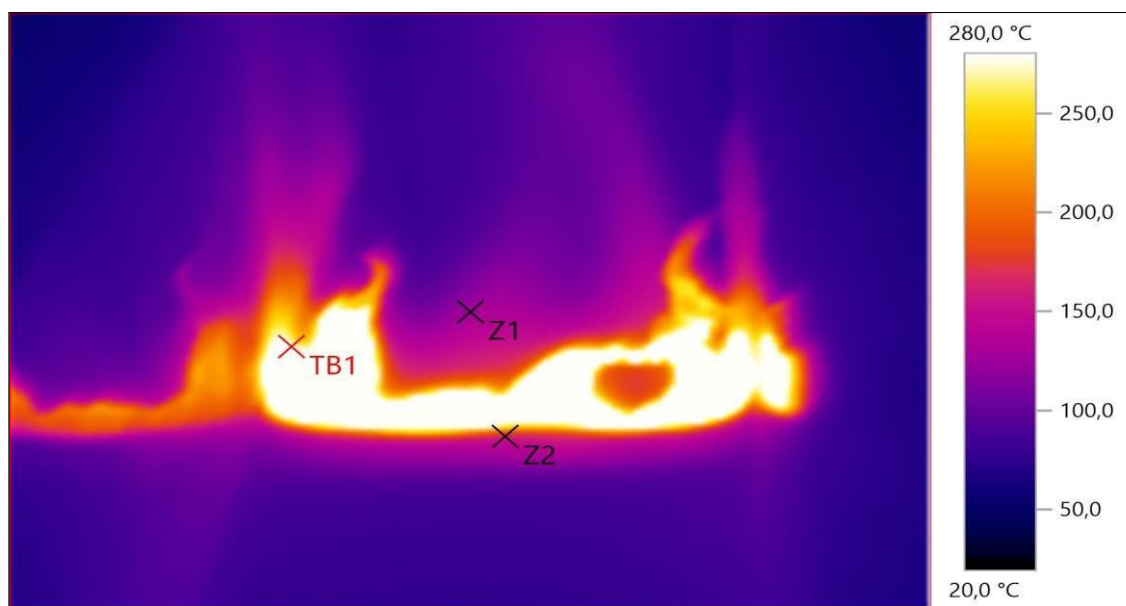
| Zn. | Prodyšnost [mm/s] | Výška plamene | Rozptyl h_p [mm ²] $\sigma^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}$ | Rychlost šíření v_p | Rozptyl v_p [mm ² /s ²] $\sigma^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}$ |
|-----|----------------------|------------------|--|--------------------------|--|
| 20č | 533 | 14 | 3,2 | 2,00 | 0,00 |
| 20z | 502 | - | - | - | - |
| 22č | 496 | 7 | 3,8 | 2,00 | 0,01 |
| 22z | 428 | 13 | 5,5 | 1,42 | 0,00 |

Dle předpokladu lampová čern díky své vysoké emisivitě zvýšila absorpci IR záření a urychlila tak posouvání plamene. Aplikace lampové černě na polyamidovém vzorku č. 20 zvýšila rychlost šíření o 0,33 mm/s, na bavlněném vzorku č. 22 také o 0,33 mm/s. Stejně tak pozlacený materiál se choval dle předpokladu, pozlacení snížilo absorpci záření, díky čemuž se textilie dostatečně rychle nezahřívala a plamen se šířil pomaleji. Zlacený povlak materiálu zapříčinil snížení rychlosti o 0,25 mm/s na bavlně

a u polyamidu dokonce naprosto zabránil šíření ohně. Výška plamene i po úpravách není nijak stálá, ani se lineárně nezměnila oproti původním hodnotám.

3.3 Měření IR kamerou a IR teploměrem

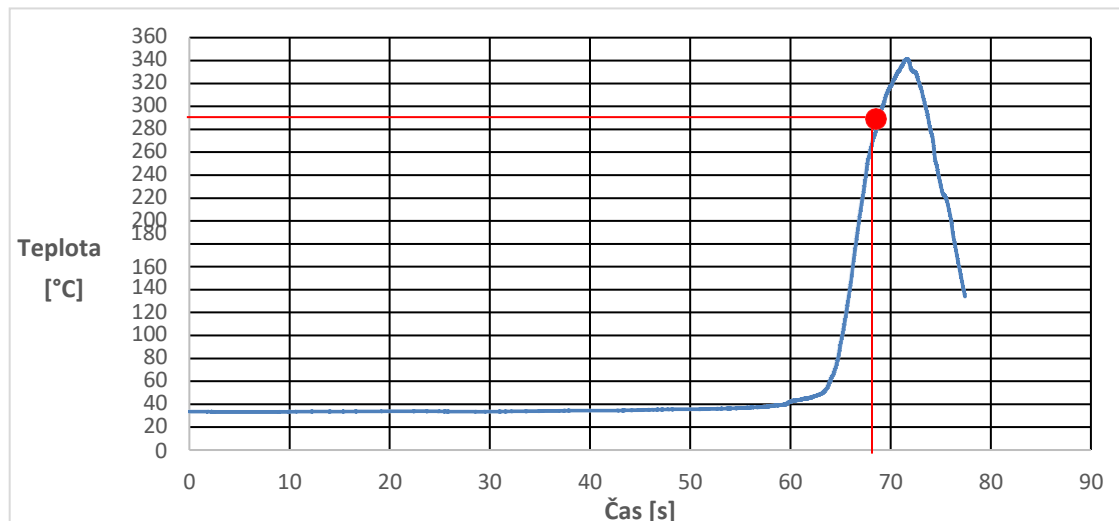
Pro měření teploty plamene bylo nutné použít IR kameru nebo IR teploměr. Jak je viditelné z obrázku 17, IR kamera je schopna snímat a zobrazit teplotu po celém povrchu textilie. Naproti tomu IR teploměr měří teplotu pouze v bodě vyznačeném laserovým paprskem, výhoda teploměru však spočívá v teplotě, kterou je schopen detekovat, maximální rozsah měření je až 900 °C, což je dle teorie teplota ve většině míst plamene. IR kamera dostupná na KMI má měřitelnou teplotu pouze do 280 °C.



Obr. 17: Teplotní snímek z IR kamery [vlastní zdroj]

Za pomoci IR kamery bylo možné určit teplotu různých částí textilie i plamene, např. textilie těsně před plamenem (Z2) byla přehřátá na 132 °C, zplodiny nad plamenem (Z1) dosahují teploty okolo 94 °C, avšak střed plamene (TB1) nebylo možné určit z důvodu teplotního omezení rozsahu kamery. Pro experiment byla důležitá nejen teplota textilie před plamenem, ale i teplota textilie v okamžiku přítomnosti plamene samotného, proto bylo pro experiment využíváno pouze IR teploměru.

Data získaná z IR teploměru bylo nutné převést do PC a zpracovat v programu Excel do grafické podoby. Na obrázku 18 je ukázka měření materiálu č. 02 (CO) ve směru osnovy.



Obr. 18: Graf průběhu měření teploty IR teploměrem (červená čára označuje okamžik vzplanutí textilie)

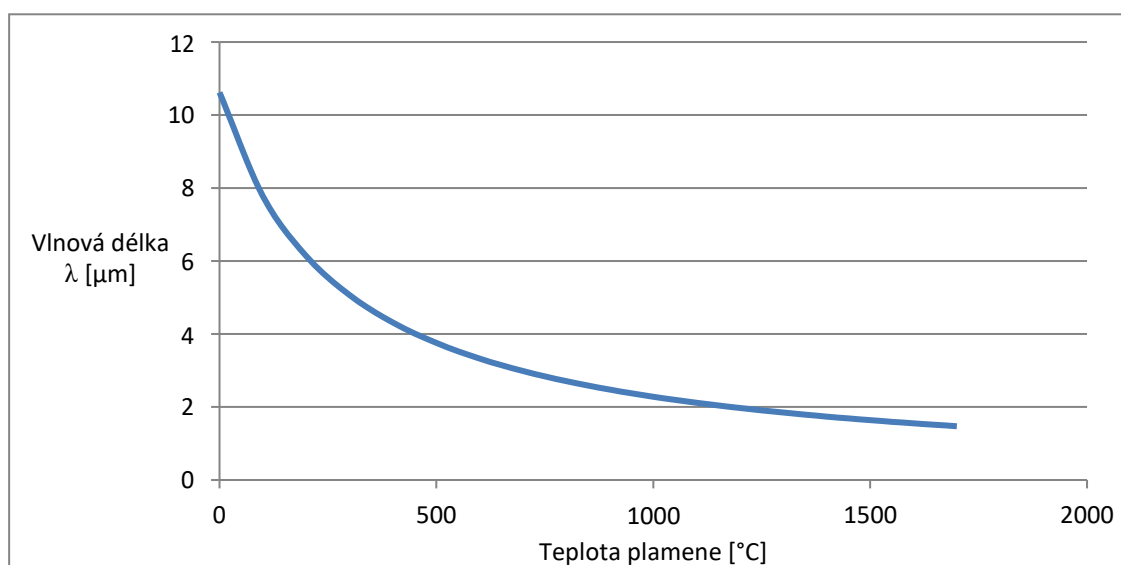
Počáteční vzdálenost plamene od měřeného bodu byla 14 cm, hodnota v bodě 0 sekund je tedy pouze teplota vzduchu v měřícím zařízení, což bylo 33 °C. S postupem času a snižující se vzdáleností plamene od sledovaného bodu teplota narůstala. V okamžiku těsného přiblížení plamene ke sledovanému bodu se textilie začala prudce zahřívat díky IR záření emitované plamenem, do té doby teplota vzrůstala velmi pozvolna. Při dosažení přibližně 68,5 sekundy došlo k zapálení textilie přímo nad snímaným bodem, teplota textilie v tomto okamžiku byla 280 °C, tento bod v grafu na obrázku 18 označují červené čáry. Následná část rostoucí křivky je již teplota plamene samotného, proto nebyly hodnoty od 68,5 sekundy zohledněny ve výpočtech.

3.4 Emise záření plamene

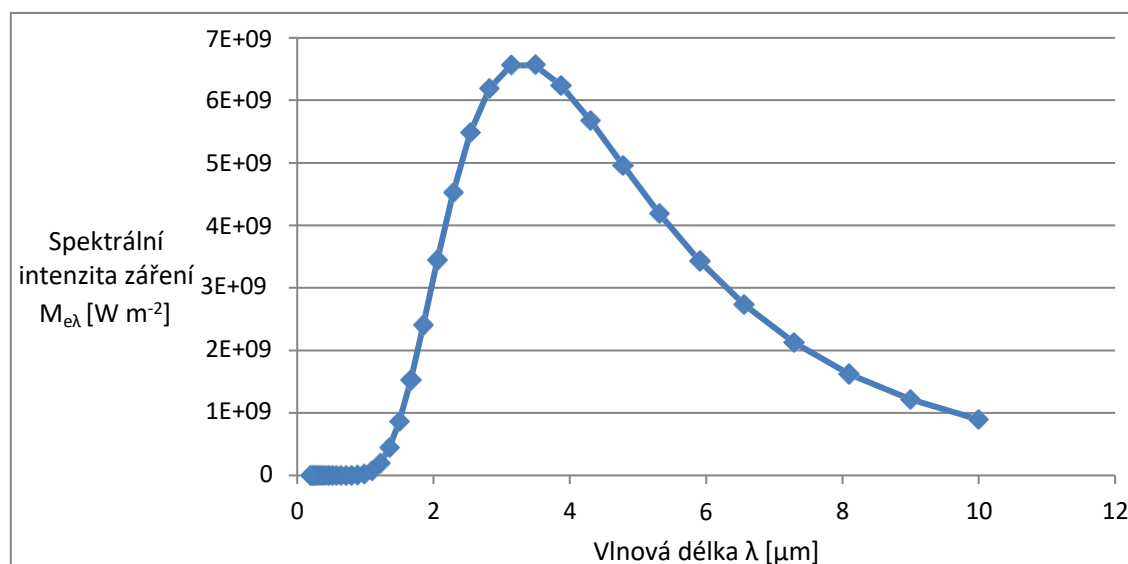
Na základě rovnice pro záření černého tělesa (10) je možné vypočítat pro danou teplotu plamene emisní maximum, hodnoty T byly pro výpočet nastaveny v rozmezí

0 °C až 1 700 °C s krokem 100 °C, výsledný graf je viditelný na obrázku 19 a potvrzuje Wienovo tvrzení, že s narůstající teplotou se maximální hodnota λ dostává do oblasti kratších vlnových délek.

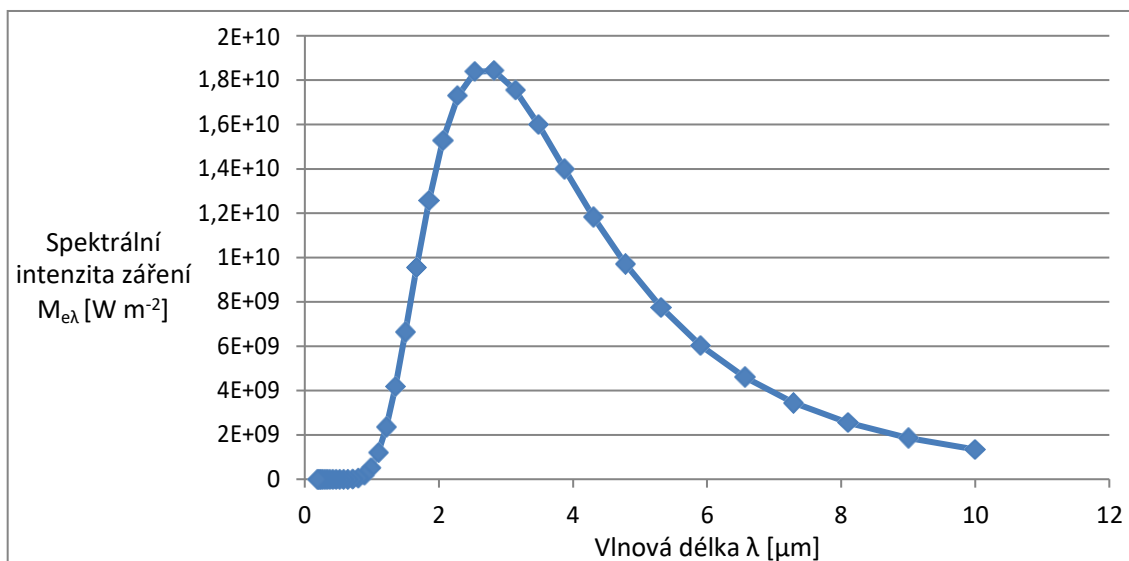
Dále je možné zjistit spektrální distribuci tohoto záření dle Planckovy rovnice (11). Pro výpočet byly použity teploty T 600 °C, 800 °C a 1 000 °C. Emise záření plamene (bodového zdroje v modelu) při teplotě 600 °C je na obrázku 20, při teplotě 800 °C na obrázku 21 a průběh emise záření při teplotě 1 000 °C na obrázku 22.



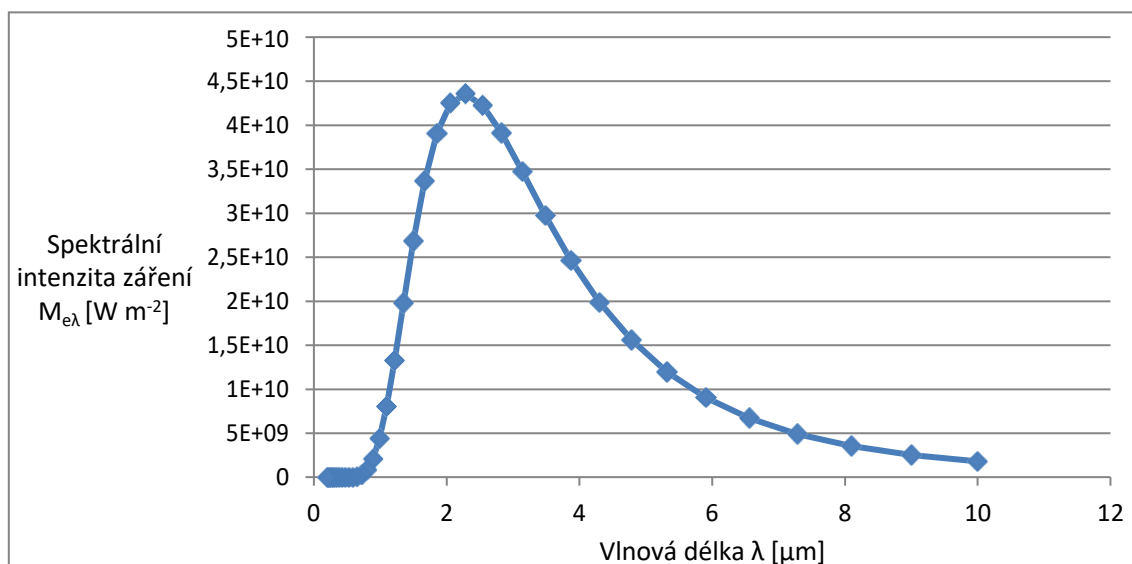
Obr. 19: Emisní maximum jako funkce teploty plamene – vypočteno dle (10)



Obr. 20: Emise záření plamene při teplotě 600 °C – vypočteno dle (11)



Obr. 21: Emise záření plamene při teplotě 800 °C – vypočteno dle (11)

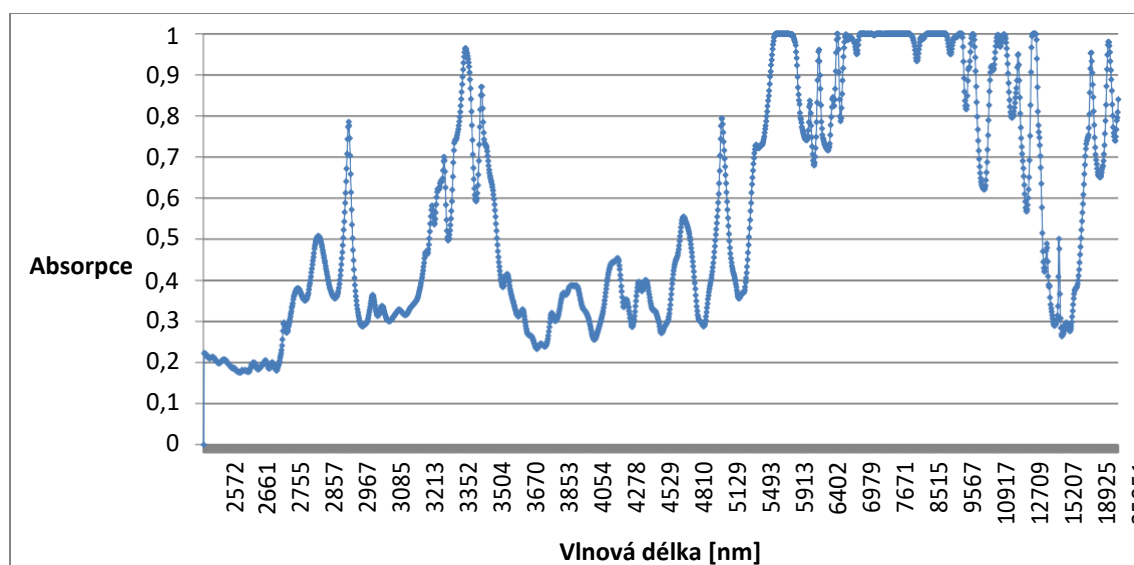


Obr. 22: Emise záření plamene při teplotě 1 000 °C – vypočteno dle (11)

Z obrázku 19 vychází, že běžný plamen emituje záření vlnových délek 1 až 10 μm. Obrázky 20, 21, 22 vykazují maxima záření plamene okolo 3,5 až 2,5 μm podle dosahované teploty, přičemž množství záření pod 2 μm je relativně malé. V této oblasti se chovají polymery celkem podobně, jak vyplývá z měření v blízké infračervené oblasti.

3.5 Naměřená spektra FTIR

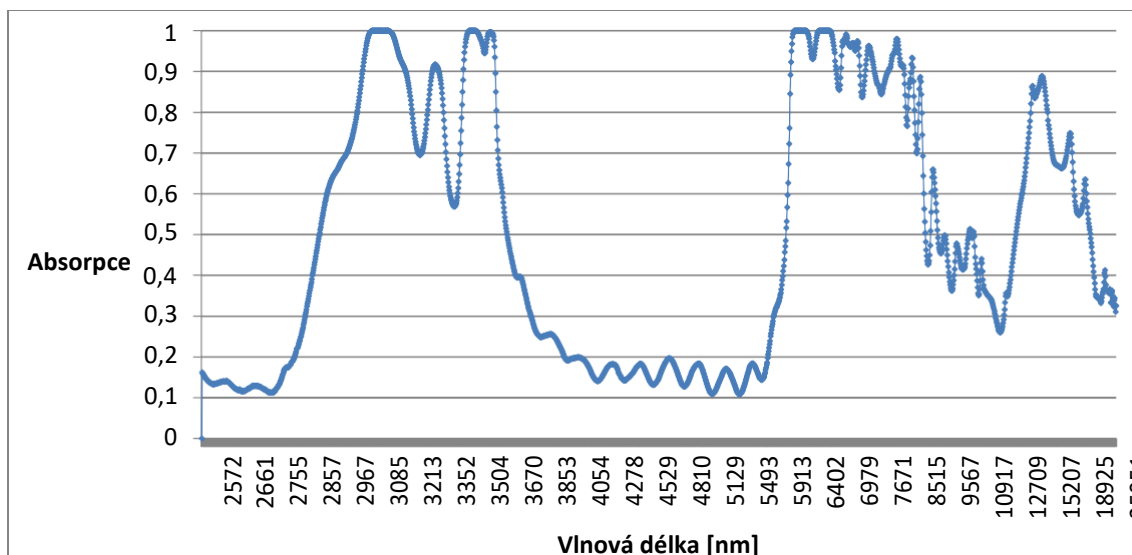
Absorpce záření byla v oblasti IR záření měřena na fóliích na průchod (transmisní spektra) a jsou neupravovaná. Ostatní spektra jsou měřena pomocí techniky ATR s využitím diamantového krystalu. Výsledky jsou korigovány na atmosféru, vyhlazeny a normalizovány na intenzitu 1 nejvyššího pásu. Tímto způsobem byla orientačně predikována absorpce záření v textilií. V této části práce jsou spektra všech měřených folií, ostatní textilní materiály jsou v příloze.



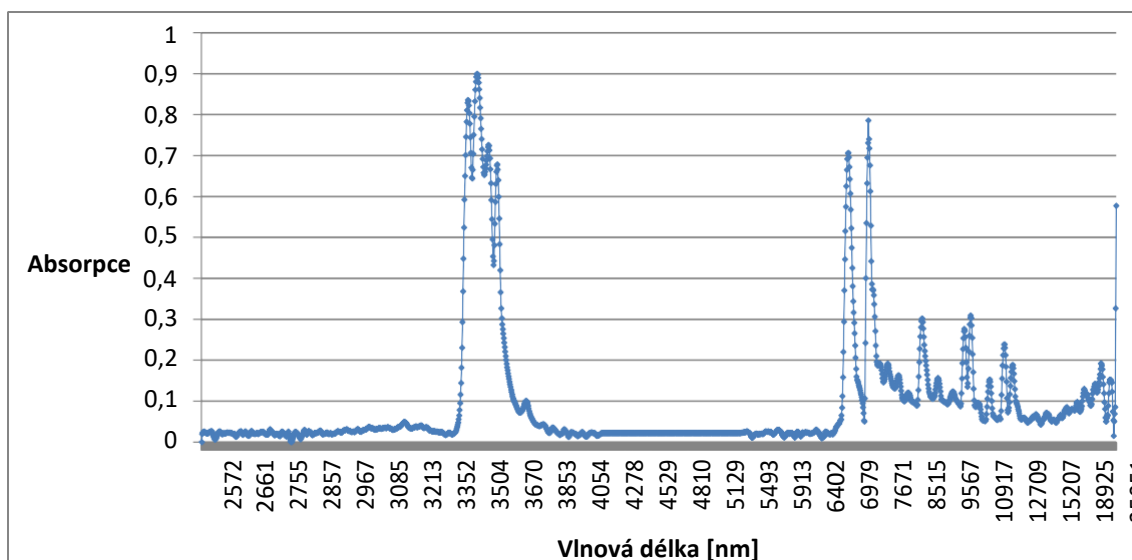
Obr. 23: Graf naměřeného FTIR spektra polyesteru

Dle grafu na obrázku 23, polyesterové materiály absorbují téměř všechno záření přibližně v rozmezí vlnových délek 6 900 nm až 10 300 nm, naopak nejméně pohlcovaného záření je v oblasti nízkých vlnových délek a v oblasti okolo 16 000 nm.

Polyamid z obrázku 24 má nejvyšší absorpci v užším pásu vlnových délek než polyester, pouze okolo 6 100 nm až 6 500 nm, navíc však pohlcuje i v úrovni vlnové délky 3 000 nm. Oblast 4 100 nm až 5 600 nm je možné označit za pásmo se zanedbatelnou pohltivostí záření.



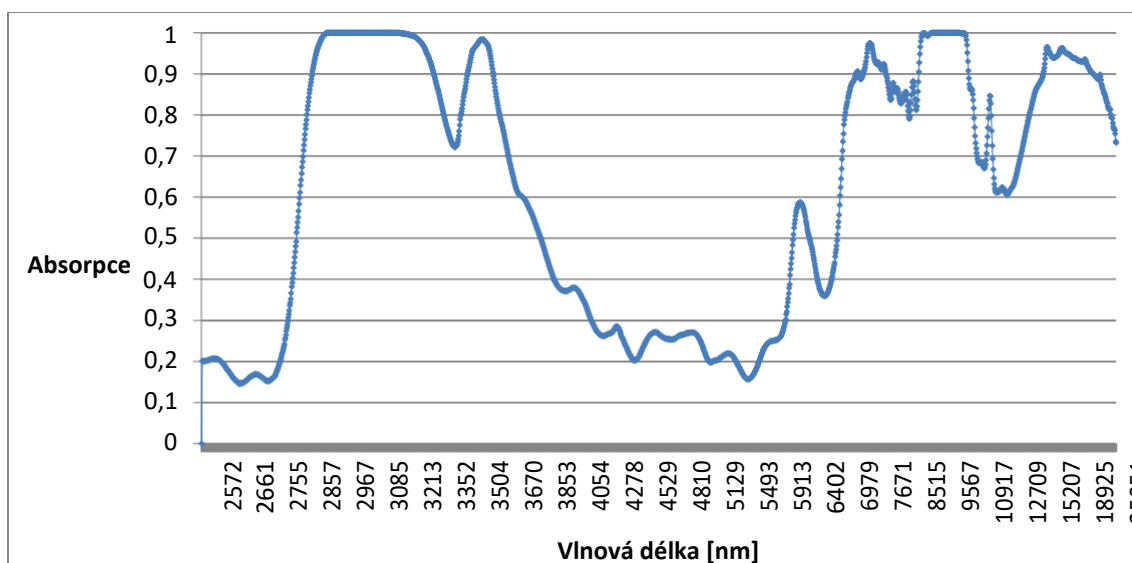
Obr. 24: Graf naměřeného FTIR spektra polyamidu



Obr. 25: Graf naměřeného FTIR spektra polypropylenu

Polypropylen je dle obrázku 25 materiál s nejnižší absorpcí ze všech zkoumaných folií, jeho schopnost pohlcovat záření nedosahuje v žádných vlnových délkách 100 % a naopak většina vlnových délek vykazuje hodnoty absorpce okolo 0 až 0,1.

U celofánové folie je predikce absorpce záření poměrně vysoká, dle grafu z obrázku 26 je patrné, že všechno IR záření je pohlcováno v pásmu 2 800 nm až 3 200 nm, stejně tak v oblasti 8 500 nm až 10 100 nm pohlcuje téměř všechno dopadající záření.



Obr. 26: Graf naměřeného FTIR spektra celofánu

3.6 Pohlčení energie textilií

Kombinací spektra emitovaného z plamene, při známé teplotě plamene a absorpčních vlastností daného polymeru, v oblasti téže vlnových délek lze spočítat množství energie, které bude materiál pohlcovat.

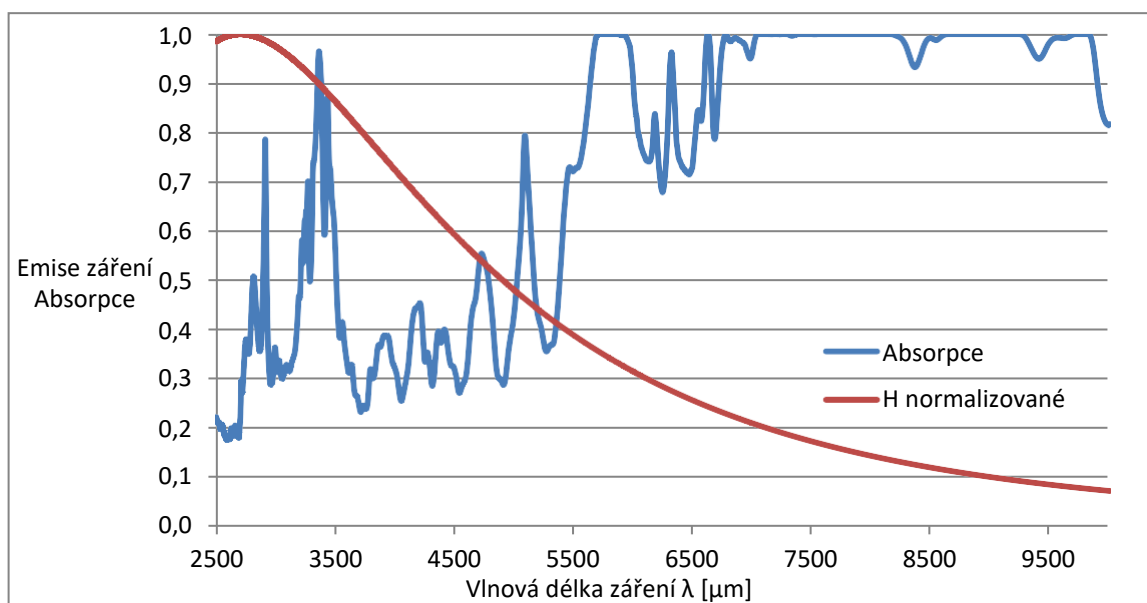
Z predikovaných hodnot absorpce záření a ze známých emisních charakteristik plamene bylo tedy pomocí níže definovaných vzorců vypočteno % zachycené energie záření v textilií, viz obr. 27, 28, 29 a 30.

Výpočet emise záření plamene $M_{e\lambda}$ dle (11) byl znormalizován pomocí vzorce (13) a pro jednodušší orientaci označen $H_{normalizované}$ [-]. Následně byla vypočtena zachycená energie [-] (14) a posledním krokem bylo určení celkového množství zachycené energie [%] (15).

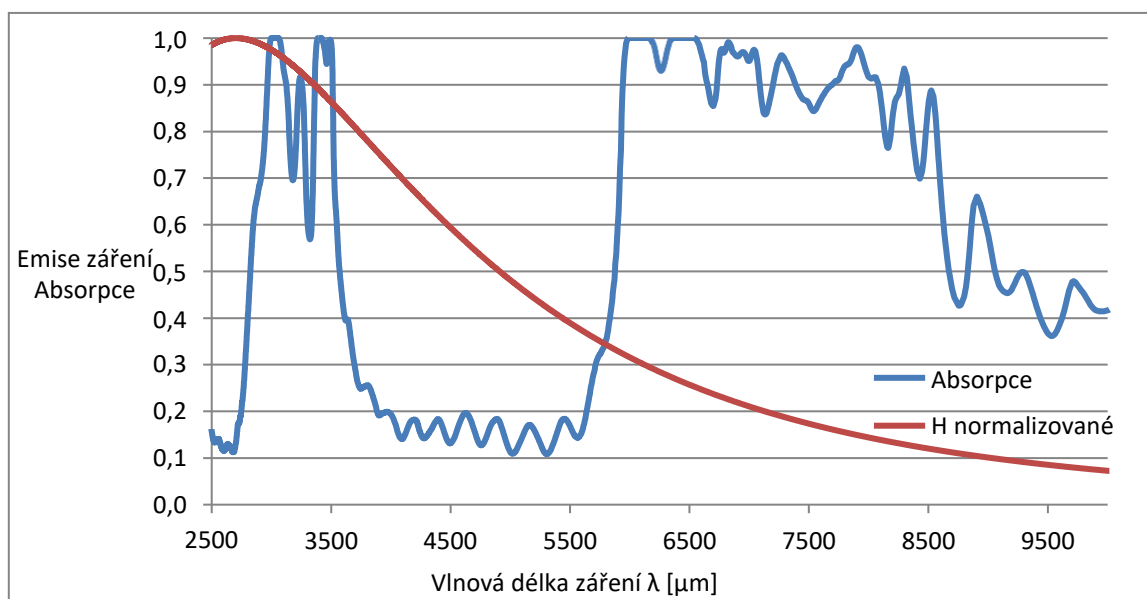
$$H_{normalizované} = \frac{M_{e\lambda_{xi}}}{\max M_{e\lambda}} \quad (13)$$

$$\text{Zachycená energie} = \text{Absorpce}_{xi} * H_{normalizované_{xi}} \quad (14)$$

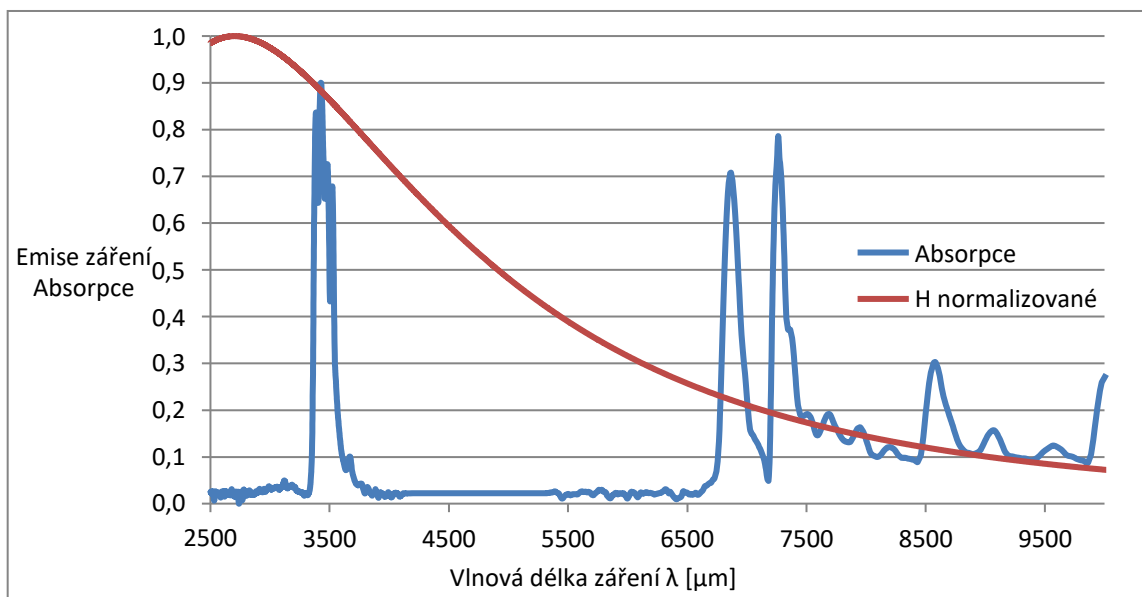
$$\text{Celkové množství zachycené energie} = \frac{\sum \text{zachycená energie}}{\sum H_{\text{normalizované}}} \quad (15)$$



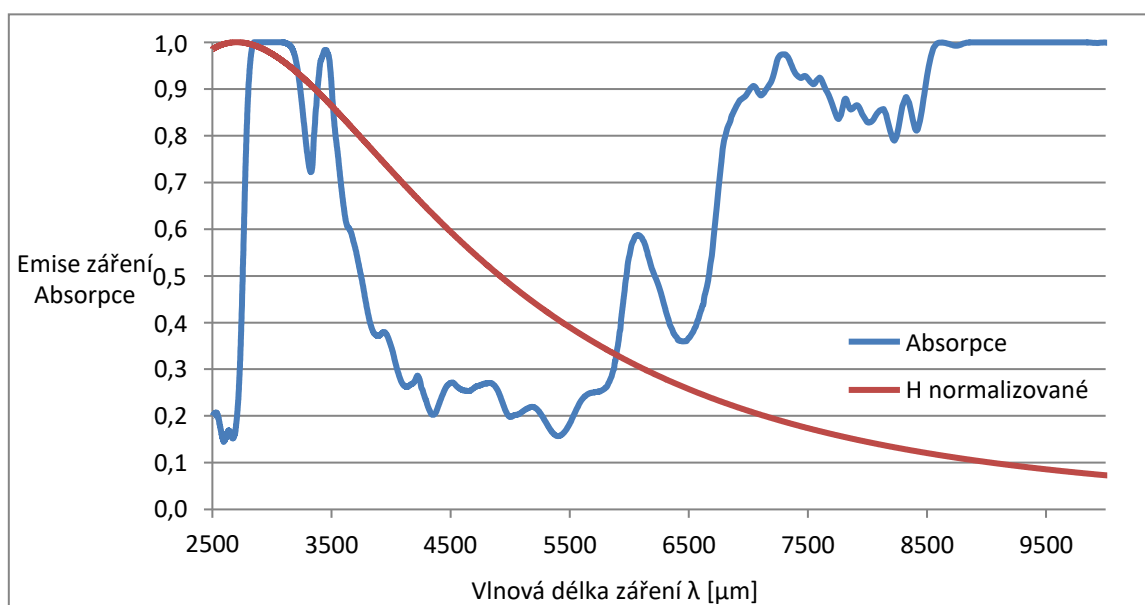
Obr. 27: Polyester, % zachycené energie: 44%



Obr. 28: Polyamid, % zachycené energie: 46%



Obr. 29: Polypropylen, % zachycené energie: 8%



Obr. 30: Celofán, % zachycené energie: 57%

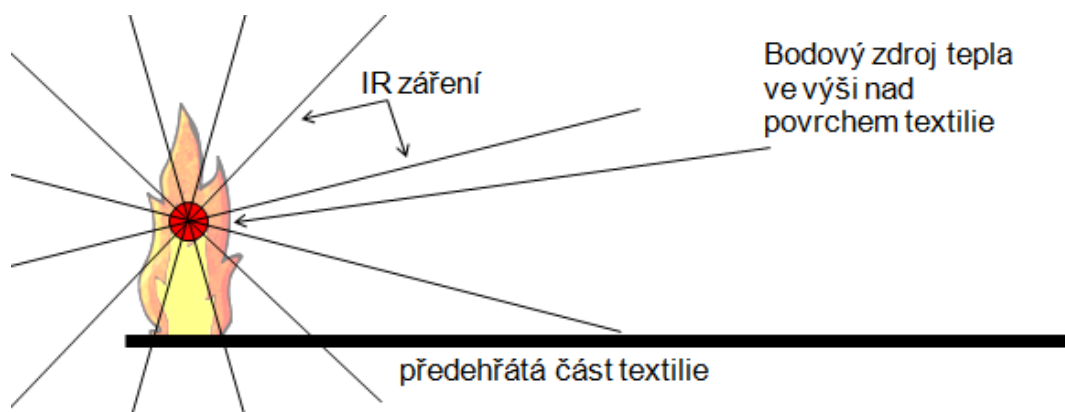
Z grafů je viditelné, že chemické složení výrazně ovlivňuje množství záření absorbované polymerem. Záchyt energie při teplotě plamene 800 °C se pohybuje u polymerů s odchylkami okolo 40 až 50 %, konkrétně celofán absorbuje 57 % energie záření, polyester zachycuje 44 % a při měření záchytu polyamidu byla absorpce energetického záření vyjádřena na 46 %. Jediný polypropylen vykazuje velmi malou absorpci záření a to 8 %.

Ačkoli dle měřených rychlostí šíření plamene vykazoval polypropylen jeden z nejrychlejších posunů plamene, zároveň to však byl materiál s nejmenší tloušťkou. Z tohoto důvodu je možné usuzovat, že u materiálu s nejnižší tloušťkou bude velmi malá absorpce IR záření dostačující pro rychlý posuv plamene, např. polyester s tloušťkou 0,09 mm bude pro posun plamene vyžadovat větší absorpci, v tomto případě 44 %. S tím souvisí i fakt o měrné tepelné kapacitě těchto materiálů, polypropylen absorbuje velmi málo IR záření, většina je odražena, a proto je pro ohřátí 1 kg tohoto materiálu o 1 °C potřeba $1,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$. Naopak polyester vykazuje vyšší absorpci IR záření, a proto je pro ohřátí 1 kg potřeba pouze $1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$.

Parametry absorpčních vlastností polymerů jsou měřeny na foliích, protože data při použití integrační koule jsou dostupná pouze pro některé tkaniny. Z tohoto důvodu byly parametry % účinnosti převodu energie na IR záření a % zachytu IR textilií v pozdějších výpočtech sloučeny do jedné konstanty, která byla kvalifikovaně odhadnuta na základě výše provedených výpočtů.

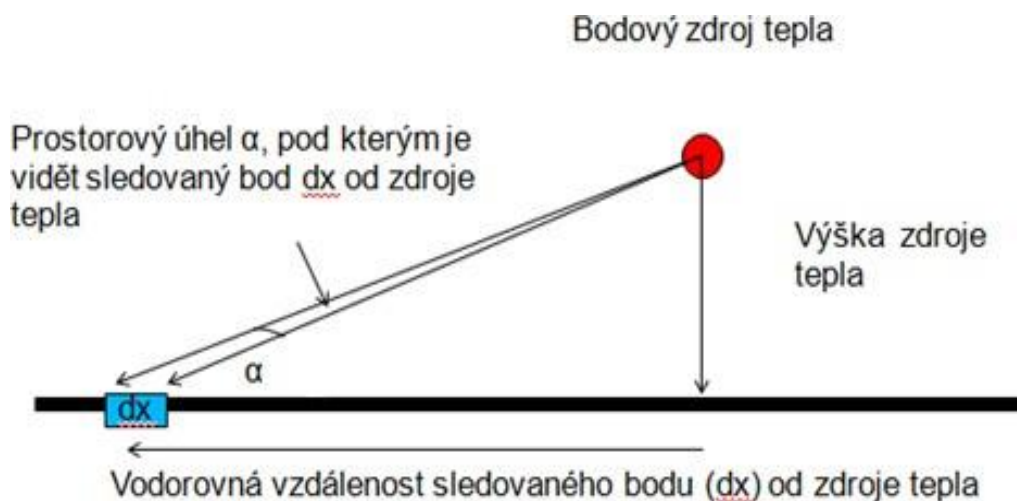
3.7 Modelování šíření plamene

V současné chvíli je všeobecně znám fakt, že s přibližujícím se plamenem se zvyšuje teplota a z toho vychází předpoklad, že se ohřívá i samotná textilie. Představou vytvářené simulace modelu je, že bodový zdroj tepla na obrázku 31, emituje IR záření, které předehřívá část textilie před plamenem a podporuje tak posun plamene.



Obr. 31: Emise záření plamene předehřívající textilii

Po zjištění aktivní výšky plamene, velikosti úhlu α , pod kterým je viditelný sledovaný bod měření (bod dx nad infrateploměrem) od bodového zdroje tepla (střed plamene), vodorovné vzdálenosti sledovaného bodu od zdroje tepla, je možné dopočítat plošnou hustotu energie dopadající na sledovaný bod, viz obrázek 32.



Obr. 32: Modelová představa šíření plamene

Úhel α je proměnná, závislá na vzdálenosti sledovaného bodu dx od plamene. Výška plamene se odvíjí od vlastností materiálu, např. plošné hmotnosti, složení atd.

3.8 Model vlivu IR záření na šíření plamene

Po podrobné analýze dat byl navržen model simulující vliv IR záření na šíření plamene v textiliích. Za využití níže definovaných vzorců, pro něž byly použity jako vstupní data informace z tabulky 13, bylo možné zkonstruovat model, který simuluje průběh šíření plamene. Data z tabulky se vztahují k bavlněnému materiálu ve vazbě plátno s finálními úpravami bělení a mercerování (vzorek 01). Ukázka průběžných výsledků z programu Excel je prezentována na obrázku 33. Výsledná modelace je viditelná na obrázku 34. Další bavlněné vzorky 02 a 03 na obrázcích 35 a 36 potvrzují funkčnost modelace.

Tab. 13: Data pro simulaci vlivu IR záření na obrázku 34

| | | |
|----------------------------|------------------|-------|
| Plošná hmotnost | g/m ² | 146 |
| Spalné teplo | J/g | 17000 |
| Měrná tepelná kapacita | J/(g. K) | 2,1 |
| Doba spalování | s | 70 |
| Dráha spalování | cm | 14 |
| Rychlost plamene | cm/s | 0,2 |
| Výkon plamene | J/s.cm | 49,64 |
| Záchyt IR energie textilií | % | 13,5 |
| Aktivní výška plamene | cm | 0,65 |
| Teplota místnosti | °C | 25 |

Hodnoty spalného tepla a měrné tepelné kapacity jsou tabelovány, při analýze materiálu byla zjištěna plošná hmotnost. Z experimentálního měření byla výpočtem zjištěna doba spalování, dráha spalování, rychlost plamene a aktivní výška plamene, následně byly dopočítány hodnoty výkonu plamene (16) a záchyt IR energie textilií viz kapitola 3.6.

$$výkon\ plamene = rychlost\ plamene * plošná\ hmotnost * spalné\ teplo \quad (16)$$

Model hoření je vždy tvořen řadou 100 bodů, proto je doba spalování podělena hodnotou 100 a vždy přičtena k předcházející hodnotě (17). V ukázkovém modelu byla doba spalování 70 sekund, z tohoto důvodu je grafické znázornění výsledků s krokem 0,7 sekundy.

$$čas_i = čas_{i-1} + \frac{doba\ spalování}{100} \quad (17)$$

| Výsledek simulace | | | |
|--------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|
| čas | vzdálenost čidla a plamene | výkon IR na čidlu | teplota ve vzdálenosti X |
| s | cm | J/s | °C |
| | | | |
| 0 | 14 | 0,003732163 | 25 |
| 0,7 | 13,86 | 0,003807873 | 25,08693773 |
| 1,4 | 13,72 | 0,003885909 | 25,17565711 |
| 2,1 | 13,58 | 0,003966368 | 25,26621345 |
| 2,8 | 13,44 | 0,004049351 | 25,35866438 |
| 3,5 | 13,3 | 0,004134965 | 25,45306997 |
| 4,2 | 13,16 | 0,004223322 | 25,54949284 |
| 4,9 | 13,02 | 0,004314541 | 25,64799834 |
| 5,6 | 12,88 | 0,004408746 | 25,74865463 |
| 6,3 | 12,74 | 0,004506069 | 25,85153292 |
| 7 | 12,6 | 0,00460665 | 25,95670758 |
| 7,7 | 12,46 | 0,004710635 | 26,06425632 |
| 8,4 | 12,32 | 0,00481818 | 26,17426043 |
| 9,1 | 12,18 | 0,004929448 | 26,28680491 |
| 9,8 | 12,04 | 0,005044614 | 26,40197875 |
| 10,5 | 11,9 | 0,005163863 | 26,51987516 |
| 11,2 | 11,76 | 0,005287388 | 26,64059177 |
| 11,9 | 11,62 | 0,005415397 | 26,76423097 |
| 12,6 | 11,48 | 0,005548109 | 26,89090012 |
| 13,3 | 11,34 | 0,005685758 | 27,02071195 |
| 14,0 | 11,2 | 0,005828591 | 27,15378481 |
| 14,7 | 11,06 | 0,005976873 | 27,2902431 |
| 15,4 | 10,92 | 0,006130883 | 27,43021758 |
| 16,1 | 10,78 | 0,006290919 | 27,57384588 |
| 16,8 | 10,64 | 0,006457302 | 27,72127287 |
| 17,5 | 10,5 | 0,00663037 | 27,87265117 |
| 18,2 | 10,36 | 0,006810486 | 28,02814172 |
| 18,9 | 10,22 | 0,006998038 | 28,18791429 |
| 19,6 | 10,08 | 0,007193441 | 28,3521481 |
| 20,3 | 9,94 | 0,007397139 | 28,52103255 |
| 21,0 | 9,8 | 0,007609607 | 28,69476788 |
| 21,7 | 9,66 | 0,007831357 | 28,87356598 |
| 22,4 | 9,52 | 0,008062936 | 29,05765128 |
| 23,1 | 9,38 | 0,008304934 | 29,24726163 |
| 23,8 | 9,24 | 0,008557984 | 29,4426494 |
| 24,5 | 9,1 | 0,00882277 | 29,6440825 |
| 25,2 | 8,96 | 0,009100028 | 29,85184569 |

Obr. 33: Ukázka výsledných dat z Excelu pro model simulace šíření plamene

$$\begin{aligned} & \text{vzdálenost čidla a plamene}_i = \\ & \text{vzdálenost čidla a plamene}_{i-1} - (\text{čas}_i - \text{čas}_{i-1}) * \text{rychlost plamene} \end{aligned} \quad (18)$$

Vzorec pro vzdálenost čidla a plamene (18) je dán rozdílem mezi předchozí vzdáleností čidla a plamene poníženou o vzdálenost dosaženou za časový krok. V tomto případě je vzdálenost dosažená během časového kroku vždy 0,14 cm, proto je grafické vyhodnocení tvořeno body v těchto vzdálenostech.

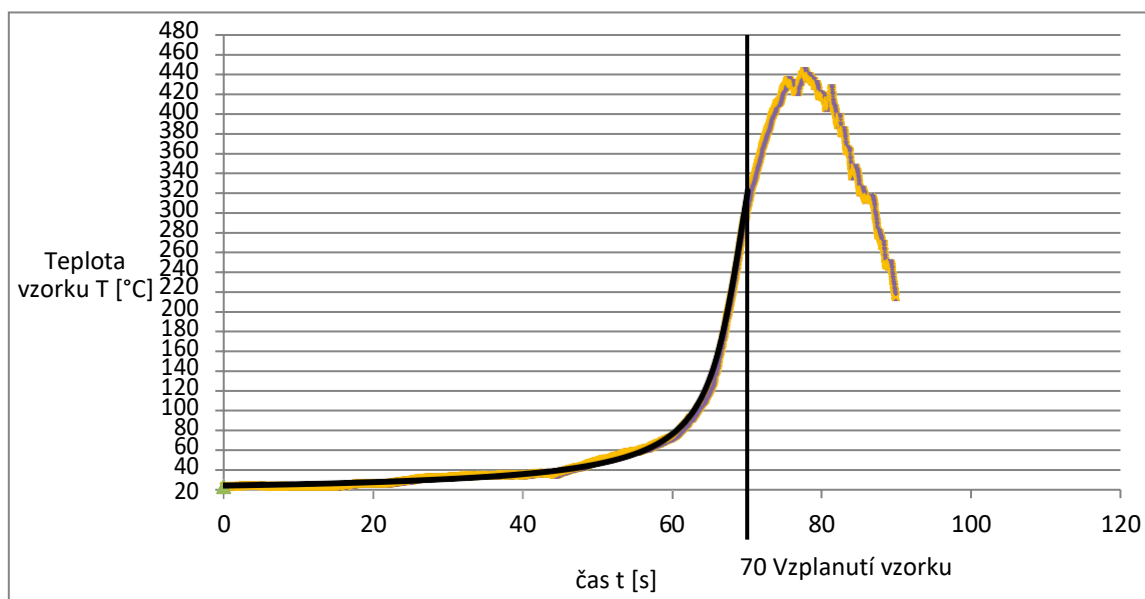
výkon IR na čidlu_i

$$\begin{aligned} & = \text{výkon plamene} * \text{záchyt IR energie textilií} * 0,01 * 1 \\ & * \left[\arcsin\left(\frac{\text{vzdálenost čidla}_i + 0,5 \, dx}{\sqrt{\text{aktivní výška}^2 + (\text{vzdálenost čidla}_i + 0,5 \, dx)^2}}\right) \right. \\ & \left. - \arcsin\left(\frac{\text{vzdálenost čidla}_i - 0,5 \, dx}{\sqrt{\text{aktivní výška}^2 + (\text{vzdálenost čidla}_i - 0,5 \, dx)^2}}\right) \right] / 6,28 \end{aligned} \quad (19)$$

Rovnice pro výpočet výkonu IR na čidlu (19) je dána parametry vzdálenosti čidla a plamene, aktivní výškou plamene a údaji z tabulky 12, tj. výkonem plamene, a záchytem IR energie textilií.

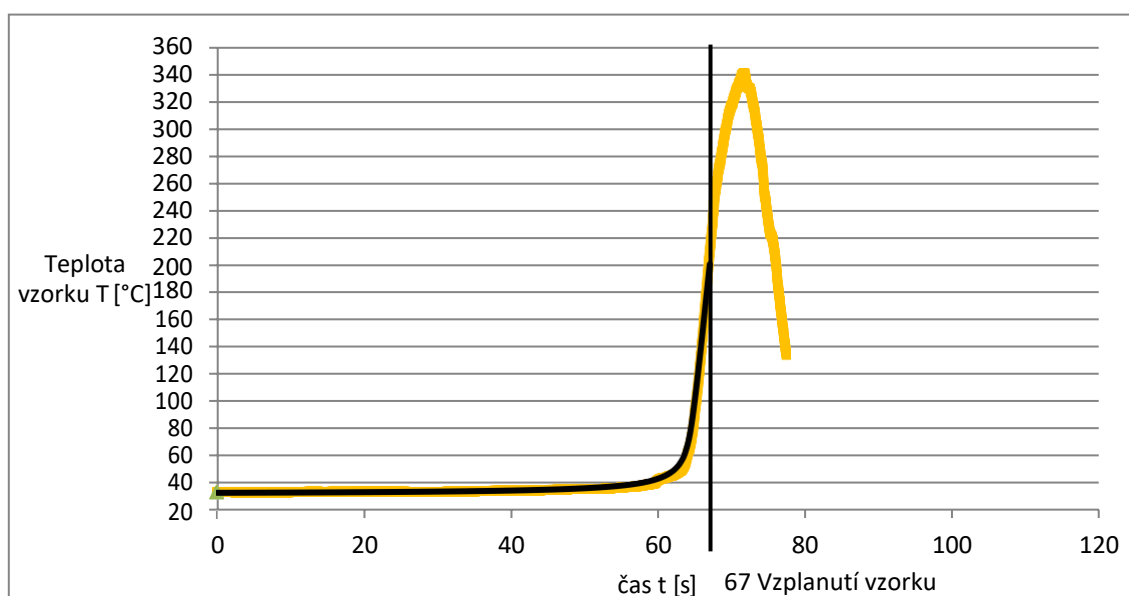
Teplota ve vzdálenosti X má hodnotu teploty z předchozího bodu navýšenou o podíl aktuálního výkonu na čidle za časový krok a plošné hmotnosti spolu s měrnou tepelnou kapacitou (20).

$$\begin{aligned} & \text{Teplota ve vzdálenosti } X_i = \\ & \text{teplota ve vzdálenosti } X_{i-1} + \frac{\text{výkon IR na čidlu}_i * (\text{čas}_i - \text{čas}_{i-1})}{\text{plošná hmotnost} * \text{měrná tepelná kapacita}} \end{aligned} \quad (20)$$



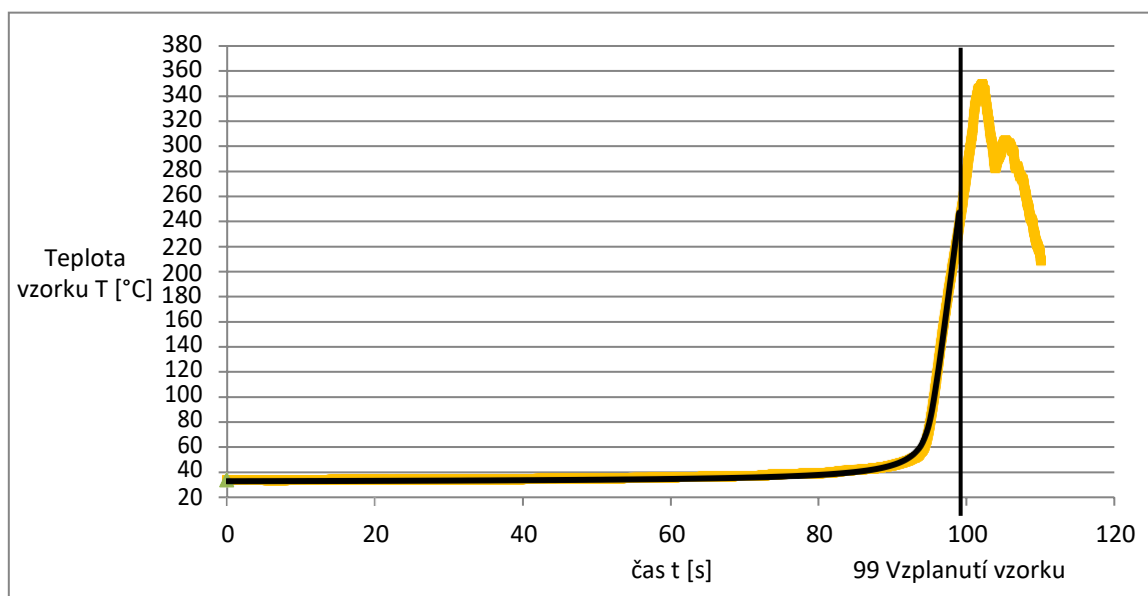
Obr. 34: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 01

Graf vyjadřuje závislost teploty na době hoření, resp. přibližování plamene k místu hoření bavlněné textilie (vzorek 01). Efektivní výška plamene byla 6,5 mm. Simulovaný model je v tomto případě ukončen při dosažení 70 sekund, v tomto okamžiku plamen dosáhl bodu nad čidlem a další průběh měření nebyl pro výpočty relevantní. Experiment značený žlutou čárou má do okamžiku ukončení měření shodný průběh jako černá čára simulovaného modelu.



Obr. 35: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 02

Grafické znázornění na obrázku 35 se vztahuje taktéž k bavlněné textilii (vzorek 02). Efektivní výška plamene byla 1,6 mm. Simulovaný model je v tomto případě ukončen při dosažení 67 sekund. Počáteční teplota 33 °C označuje teplotu v měřicím zařízení.



Obr. 36: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 03

Obrázek 36 znázorňuje porovnání simulace a průběhu experimentu na bavlněné textilii (vzorek 03). Efektivní výška plamene při tomto měření byla 1,3 mm. Plamen dosáhl bodu měření po 99 sekundách. Stejně jako všechny předešlé měření ukazuje křivka na grafu pozvolné zvyšování teploty až do okamžiku těsného přiblížení plamene k čidlu, od tohoto okamžiku teplota začala prudce stoupat.

4. Závěr

V rámci této diplomové práce se podařilo kvantifikovat vliv IR záření na šíření plamene při hoření horizontálně umístěné textilie a použít získaná data k predikci rychlosti šíření plamene. Tyto dílčí výsledky ukazují na skutečnost, že pomocí jednoduše představitelného šíření tepla sáláním lze predikovat rychlost šíření plamene v horizontálně umístěné textilií.

Výsledky měření vyvrátily tvrzení o závislosti rychlosti posunu plamene na samotné výšce plamene, přesto však tato proměnná není zanedbatelná v modelu simulace. Co se týká rychlosti šíření plamene, je nejrizikovějším materiálem polypropylen, ačkoli vykazoval nejnížší absorpci IR záření, měl i nejnížší tloušťku materiálu. Díky tomu je možné tvrdit, že množství IR záření každého materiálu je úzce spjato s tloušťkou daného materiálu. Práce dále potvrdila předpoklad, že se zvýšením či snížením absorpce IR záření textilií je možné ovlivnit rychlost šíření plamene a tím v budoucnu dopomoci nejen při vývoji žáruvzdorných úprav, ale v některých případech dokonce zamezit vzniku plamene. V závěru práce se úspěšně povedlo modelovat vliv IR záření na šíření plamene, díky čemuž je možné odhadnout nejen rychlost plamene, ale i průběh hoření.

Komplexnost všech jevů byla větší, než bylo původně předpokládáno, a proto by bylo vhodné pro další vývoj v této oblasti do výpočtu (alespoň v případě poréznějších textilií) zahrnout i tepelné ztráty prouděním a případně i ztráty spojené s vlastním sáláním zahřáté textilie.

Seznam použité literatury

- [1] DEMIDOV, Petr Georgijevič. *Hoření a vlastnosti hořlavých látek*. Praha: Československý svaz požární ochrany, 1966. Knižnice požární ochrany (Československý svaz požární ochrany).
- [2] ODVÁRKA, Jaroslav. *Finální úpravy textilií: návody na cvičení*. Liberec: Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7083-405-6.
- [3] BRUMOVSKÁ, Irena. *Speciální chemie pro požární ochranu: učební texty*. Praha: Ministerstvo vnitra České republiky, 1992. ISBN 80-901368-0.
- [4] *Základy požární taktiky - Rozdělení hořlavých látek a jejich požárně technické charakteristiky*, [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: http://www.firebrno.cz/uploads/uo_vyskov/dokkstaz/PT_rozdeleni_horlavin.pdf
- [5] *Teplota vznícení*, [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://sdh-olesnik.blog.cz/1102/teplota-vznicieni>
- [6] RŮŽIČKA, František. *Rozdělení hořlavých látek a jejich požárně technické charakteristiky*. 1. vyd. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. ISBN 80-86111-46-6.
- [7] PORTZ, Henry. *Brand - und Explosionsschutz von A-Z: Begriffserläuterungen und brandschutztechnische Kennwerte*. Springer-Verlag, 2015. ISBN 978-3-322-80198-2.
- [8] *Teplota hoření*, [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://luzs.cz/teplota-horeni.html>
- [9] BUCHAR, Josef a Jiří KRYŠTŮFEK, ed. *Pokroky vědy a techniky v textilním průmyslu: zušlechťování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [10] *Textiles in automotive engineering* [online]. [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: http://textilelibrary.weebly.com/uploads/1/1/7/4/11749432/textiles_in_automotive_engineering_walter_fung_2001.pdf
- [11] BLAŽEJ, Anton. *Špeciálne chemické úpravy textilií*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia literatúry pre spotrebný priemysel. ISBN 63-261-86.
- [12] *Finální úpravy textilií V*, [online]. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18731831-Finalni-upravy-textilii-v-doc-ing-michal-vik-ph-d-ing-martina-vikova-ph-d.html>

- [13] KISLINGER, Radek. *Požárně technické charakteristiky a technické informace pro potřeby ZPP*. Praha: Ministerstvo vnitra, Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2015. ISBN 978-80-86466-72-9.
- [14] *Finální úpravy IX*, [online]. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18297865-Finalni-upravy-ix-doc-ing-michal-vik-ph-d.html>
- [15] NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01599-8.
- [16] Thermal Properties [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: https://www.mep.co.jp/en/pdf/product/iupi_nova/physicality_04.pdf
- [17] SÝKORA, Karel. *Základy sdílení tepla*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1962. Učební texty vysokých škol.
- [18] NOŽIČKA, Jiří. *Nauka o proudění a sdílení tepla: určeno pro posluchače fak. elektrotechn.* Praha: SNTL, 1960. Učební texty vysokých škol.
- [19] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [20] Electromagnetic spektrum, [online]. [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/electromagnetic-spectrum.html>
- [21] Elektomagnetické spektrum, [online]. [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/elektromagneticke-spektrum/>
- [22] Infračervené záření, [online]. [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/infracervene-zareni>
- [23] JABRAN, Khawar a Bhagirath Singh CHAUHAN. *Non-chemical weed control*. London, United Kingdom: Academic Press, an imprint of Elsevier, [2018]. ISBN 0128098821.
- [24] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj! z fyziky*. Brno: Didaktis, c2004. Odmaturuj!. ISBN 80-86285-39-1.
- [25] Übungen zur Atomphysik IV, [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <http://magnet.atp.tuwien.ac.at/ts/fhpw/Ue4.pdf>
- [26] MALÁ, Zuzana, Danuše NOVÁKOVÁ a Rudolf NOVÁK. *Fyzika II*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04365-3.

- [27] SAZIMA, Miroslav, Jiří SCHNELLER a Vladimír KMONÍČEK. *Teplo*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Česká matice technická. ISBN 80-03-00043-2.
- [28] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [29] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [30] Hodnoty emisivity běžných materiálů, [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/030/.content/sys-cs/resource/PDF/TechnickaMereni/5_EmisivitaBeznychMaterialu.pdf
- [31] Termografie, [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps3/6.html>
- [32] GAUSSORGUES Gilbert. *Infrared Thermography. Microwave and RF Techniques and Applications*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9401107114.
- [33] Jak funguje termovize, [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.naposed.cz/cs/content/33-jak-funguje-termovize>
- [34] Princip bezdotykového měření teploty, [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [35] Principles of Infrared Thermometry, [online]. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.omega.com/temperature/z/pdf/z059-062.pdf>
- [36] LIPTÁK, Béla G., ed. *Instrument engineers' handbook*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, c2003. ISBN 0-8493-1083-0.
- [37] Bavlna, [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.guffoo.cz/textil-tul/index.php?nid=2634&lid=cs&oid=305066>
- [38] *Příručka textilního odborníka*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [39] Chemická vlákna, [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/tool/print/index.php?id=2363>
- [40] Zlato – vlastnosti, [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.ezlato.cz/zlato-vlastnosti/cz/t-126/>
- [41] Balzers Sputter Coater SCD 050, [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://docplayer.net/21610138-Balzers-sputter-coater-scd-050.html>

- [42] SCD 005 Cool Sputter Coater, [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://www.baltic-paerparation.de/scd-005.html?file=files/Baltic/Broschueren/Brochure%20SCD%20005.PDF>
- [43] O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích, [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [44] Air Permeability Tester FX 3300, [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: http://www.artec-testapparatuur.nl/content/artec/producten/pdf/3300-III_leaflet_en+.pdf
- [45] GIM 3590 – LaserSight, [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: https://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/bda/GIM3590_e.pdf
- [46] JANDERA, Pavel. *Atomová a molekulová spektroskopie*. 1. vyd. Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická, 1984.

Seznam obrázků

- Obr. 1: Popis procesu hoření
- Obr. 2: Teploty v různých částech plamene
- Obr. 3: Elektromagnetické spektrum
- Obr. 4: Vyzařování černého tělesa
- Obr. 5: Závislost emisivity na vlnové délce
- Obr. 6: Průběh bezdotykového měření
- Obr. 7: Náčrt zařízení pro sledování šíření plamene
- Obr. 8: Zkonstruované zařízení pro sledování šíření plamene
- Obr. 9: Připravený vzorek pro spalování
- Obr. 10: Pozlacený vzorek (vlevo) a vzorek s nánosem lampové černi (vpravo)
- Obr. 11: Screenshot z pořízeného záznamu se spalováním
- Obr. 12: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na výšce plamene
- Obr. 13: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na prodyšnosti materiálu
- Obr. 14: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na tloušťce materiálu
- Obr. 15: Graf závislosti rychlosti šíření plamene na plošné hmotnosti materiálu
- Obr. 16: Graf průměrné rychlosti šíření plamene jednotlivých materiálů
- Obr. 17: Teplotní snímek z IR kamery
- Obr. 18: Graf průběhu měření teploty IR teploměrem
- Obr. 19: Emisní maximum jako funkce teploty plamene – vypočteno dle (10)
- Obr. 20: Emise záření plamene při teplotě 600 °C – vypočteno dle (11)
- Obr. 21: Emise záření plamene při teplotě 800 °C – vypočteno dle (11)
- Obr. 22: Emise záření plamene při teplotě 1 000 °C – vypočteno dle (11)
- Obr. 23: Graf naměřeného FTIR spektra polyesteru
- Obr. 24: Graf naměřeného FTIR spektra polyamidu
- Obr. 25: Graf naměřeného FTIR spektra polypropylenu
- Obr. 26: Graf naměřeného FTIR spektra celofánu
- Obr. 27: Polyester, % zachycené energie: 45%
- Obr. 28: Polyamid 6, % zachycené energie: 46%
- Obr. 29: Polypropylen, % zachycené energie: 8%
- Obr. 30: Celofán, % zachycené energie: 57%

- Obr. 31: Emise záření plamene přehřívající textilií
Obr. 32: Modelová představa šíření plamene
Obr. 33: Ukázka výsledných dat z Excelu pro model simulace šíření plamene
Obr. 34: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 01
Obr. 35: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 02
Obr. 36: Demonstrativní srovnání experimentu a simulace pro vzorek 03

Seznam tabulek

- Tab. 1: Teploty vznícení vybraných látek
Tab. 2: Teploty plamene
Tab. 3: Limitní kyslíkové číslo vybraných látek
Tab. 4: Vznětlivost výrobků z plošných textilií
Tab. 5: Měrné tepelné kapacity vybraných látek
Tab. 6: Emisivita vybraných materiálů
Tab. 7: Souhrn informací o použitých textiliích
Tab. 8: Informace o použitých textiliích po úpravách
Tab. 9: Informace o použitých doprovodných foliích
Tab. 10: Specifikace infrateploměru GIM 3590
Tab. 11: Výsledné hodnoty testovaných materiálů
Tab. 12: Výsledné hodnoty testovaných materiálů po úpravách
Tab. 13: Data pro simulaci vlivu IR záření na obrázku 34

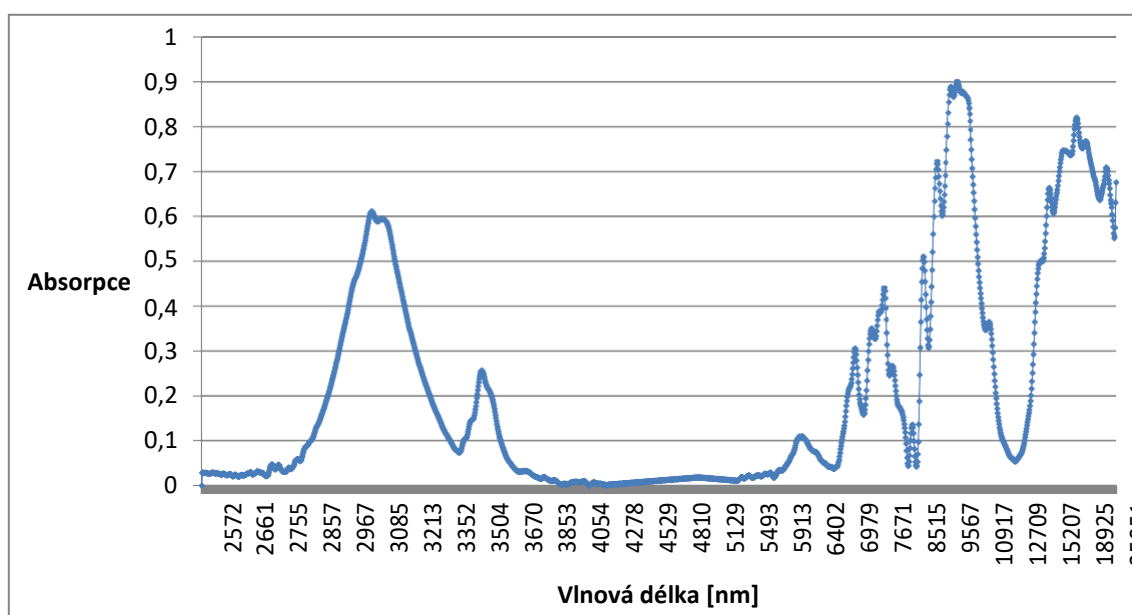
Seznam příloh

- Příloha 1: Graf naměřeného FTIR spektra bavlny
Příloha 2: Graf naměřeného FTIR spektra acetátového hedvábí
Příloha 3: Graf naměřeného FTIR spektra triacetátu
Příloha 4: Graf naměřeného FTIR spektra viskózy
Příloha 5: Graf naměřeného FTIR spektra vlny
Příloha 6: Graf naměřeného FTIR spektra polyakrylonitrilu

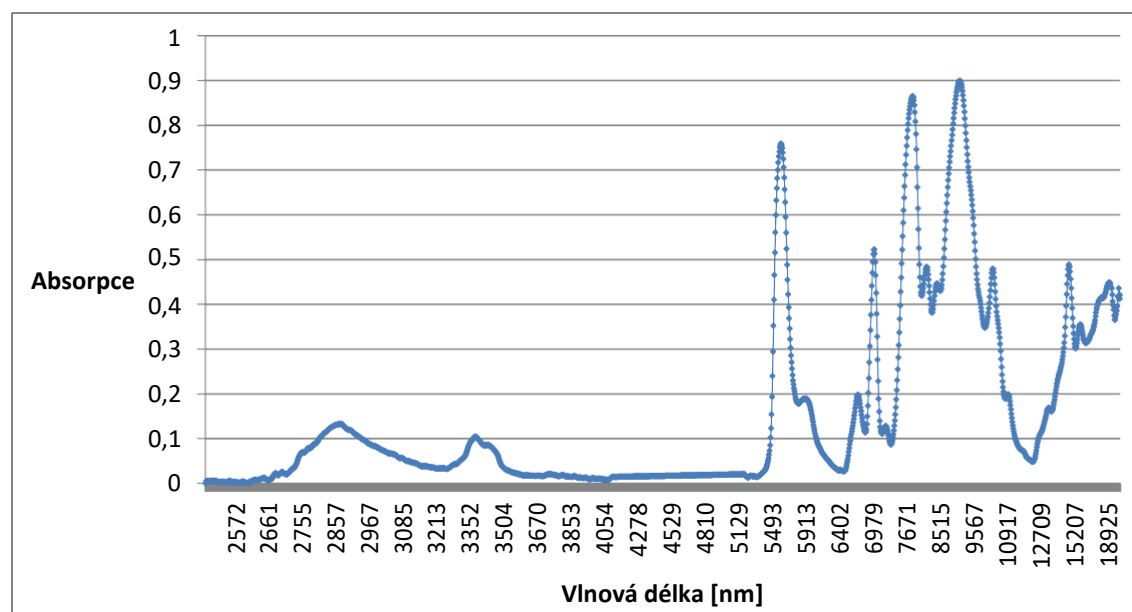
Příloha 7: Graf naměřeného FTIR spektra polyesteru a bavlny

Příloha 8: Graf naměřeného FTIR spektra polypropylenu a bavlny

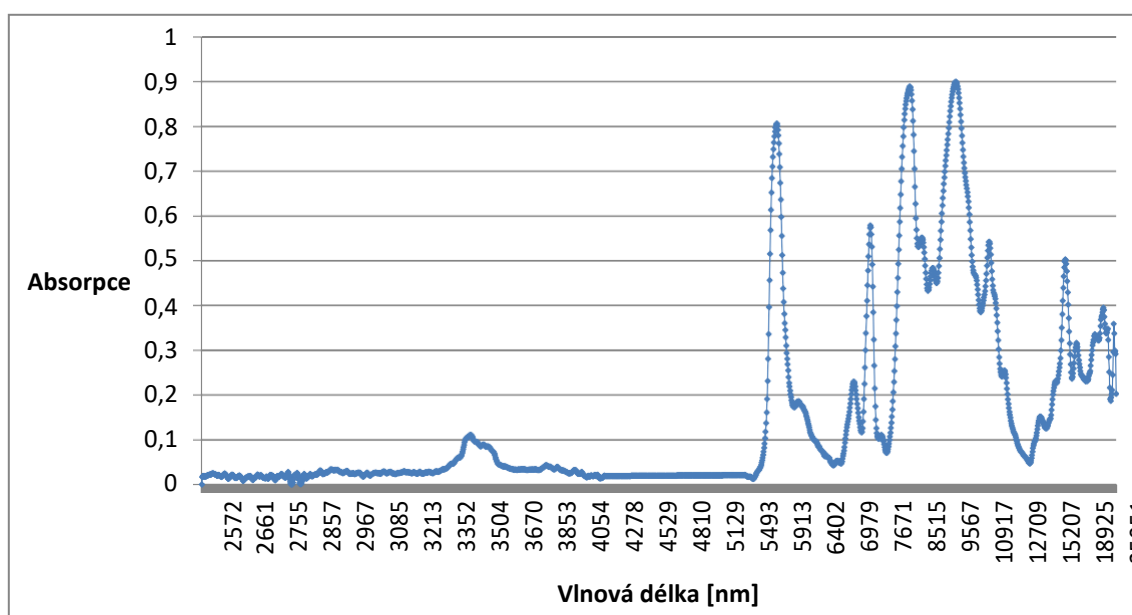
Příloha 1: Graf naměřeného FTIR spektra bavlny



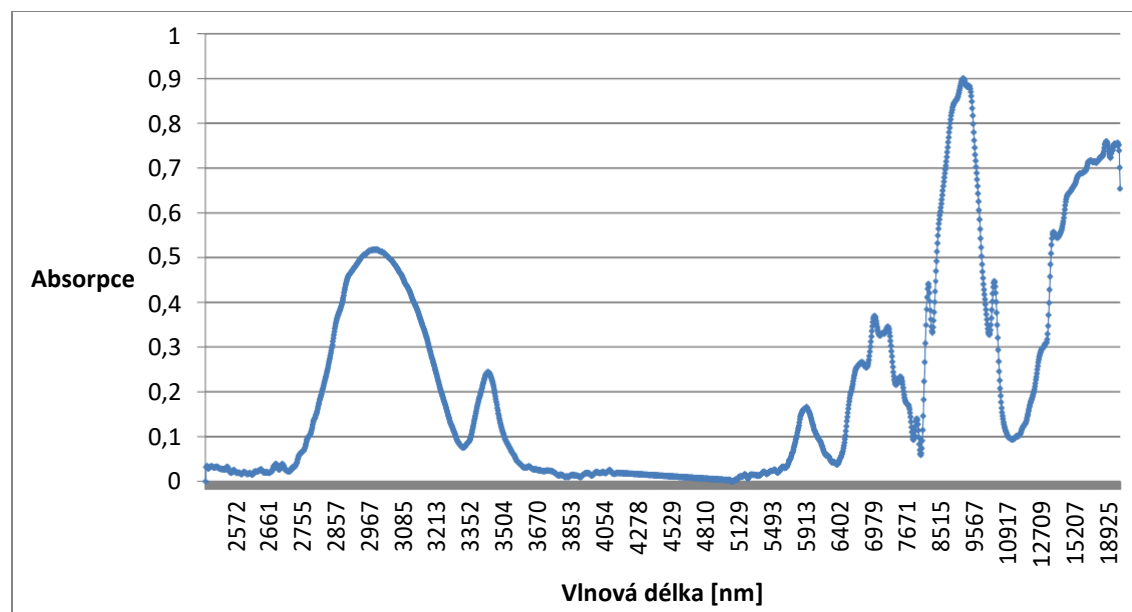
Příloha 2: Graf naměřeného FTIR spektra acetátového hedvábí



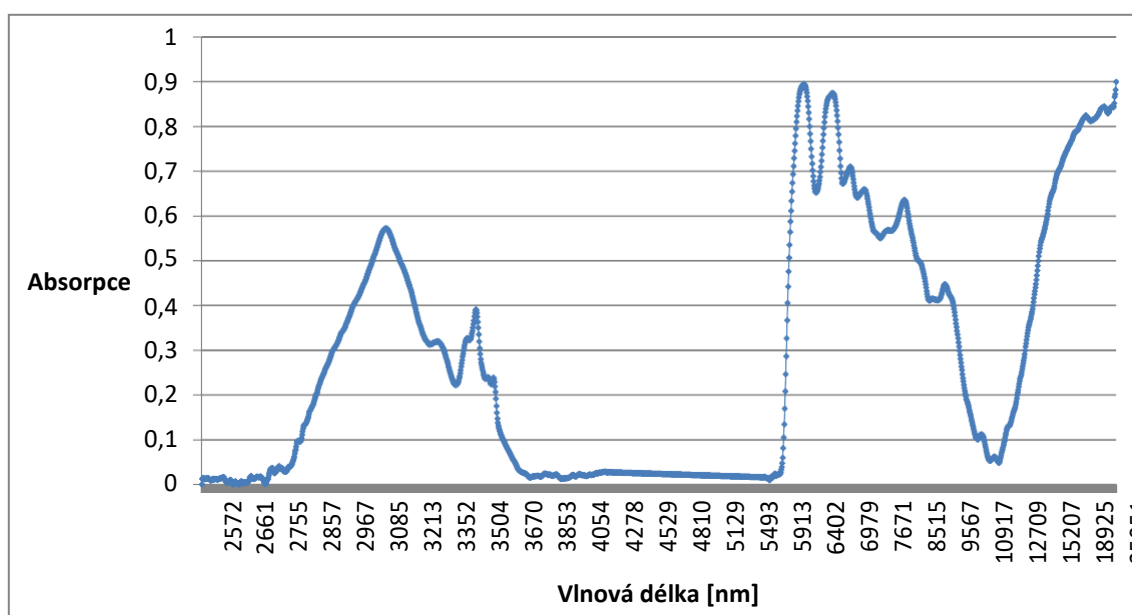
Příloha 3: Graf naměřeného FTIR spektra triacetátu



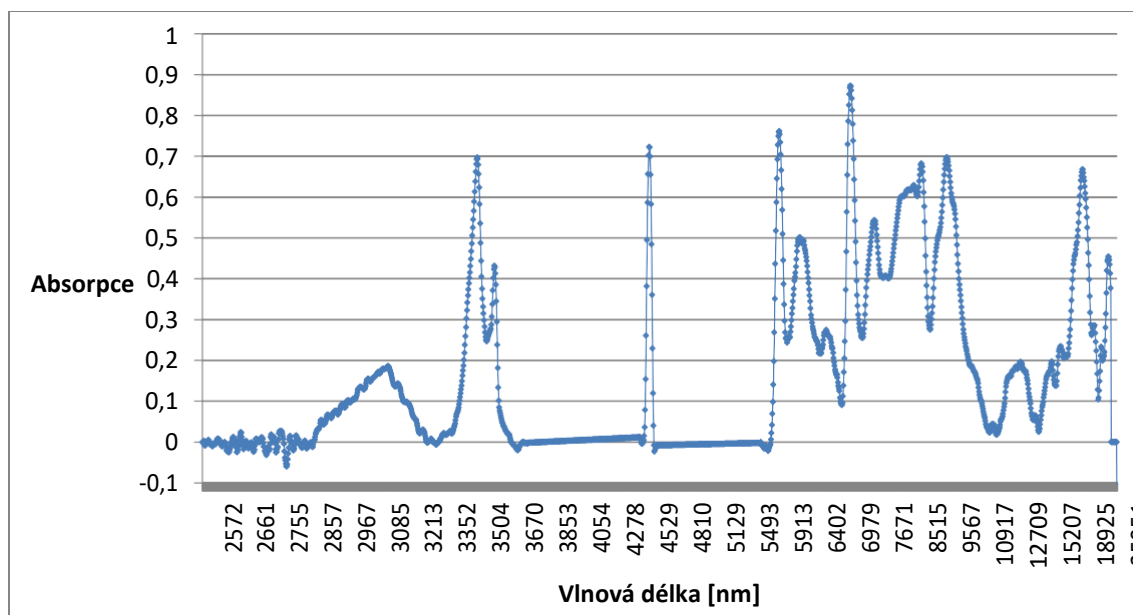
Příloha 4: Graf naměřeného FTIR spektra viskózy



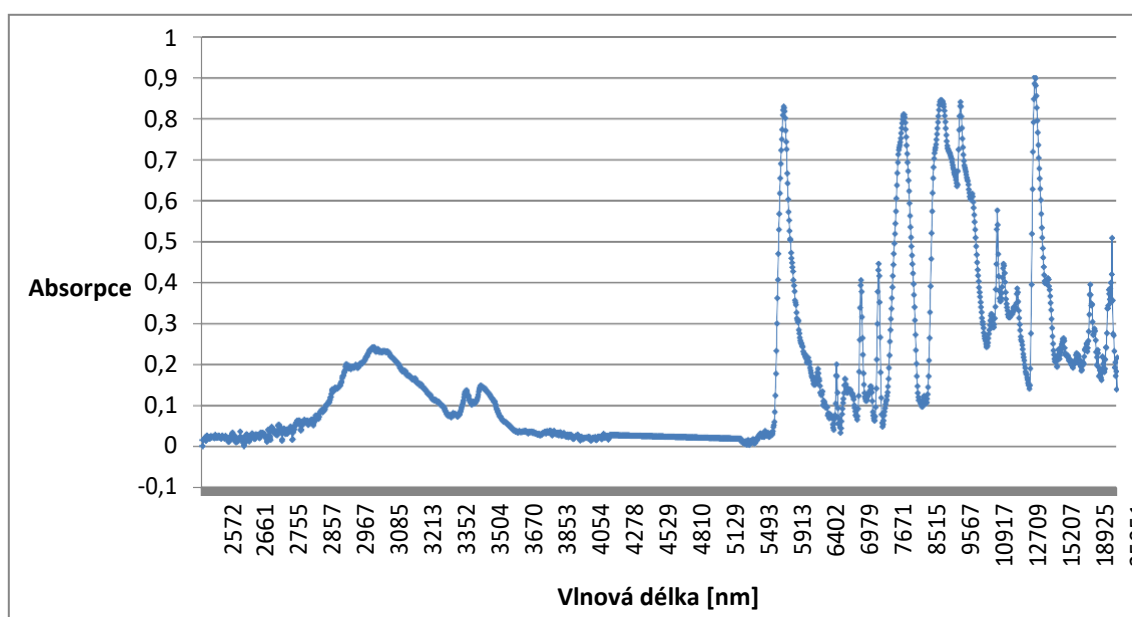
Příloha 5: Graf naměřeného FTIR spektra vlny



Příloha 6: Graf naměřeného FTIR spektra polyakrilonitrilu



Příloha 7: Graf naměřeného FTIR spektra polyesteru a bavlny



Příloha 8: Graf naměřeného FTIR spektra polypropylenu a bavlny

